

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

INTÉGRATION DES PRINCIPES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE À LA
CONCEPTION EN INGÉNIERIE : LA CONCEPTION DURABLE APPLIQUÉE
AUX SYSTÈMES MUNICIPAUX D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES

Thèse de doctorat
Spécialité : génie civil avec cheminement interdisciplinaire en environnement

Bruno Gagnon

Jury : Roland LEDUC (directeur)
Luc SAVARD (co-directeur)
Christian BOUCHARD
Hubert CABANA
Alexandre CABRAL

Sherbrooke (Québec) Canada

30 mai 2012

IV - 2220



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-89693-8

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-89693-8

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

*À Félix-Antoine et Émile
Représentants des générations futures...*

RÉSUMÉ

Le contexte dans lequel les ingénieurs évoluent a beaucoup changé au cours des deux dernières décennies. De nombreuses organisations désirent désormais orienter leurs activités pour s'inscrire dans un développement dit plus durable. En tant qu'employés de telles organisations, les ingénieurs sont appelés à modifier leurs pratiques professionnelles. Néanmoins, la prise en compte systématique des principes du développement durable en ingénierie est peu répandue et ce pour de nombreuses raisons. Le domaine du génie de l'environnement, auquel se rattache l'assainissement des eaux usées, occupe une position particulière face à l'ingénierie durable. Ce domaine est précurseur, car il se consacre à des problématiques environnementales spécifiques depuis plusieurs années. Toutefois, la considération d'une gamme variée d'enjeux de développement durable peut se voir entravée par un accent trop prononcé sur le volet environnemental. Au Québec, les infrastructures municipales d'assainissement des eaux usées ont en grande partie été construites au cours des années 1980 et 1990 et plusieurs de ces systèmes devront bientôt être modernisés ou remplacés. Il est donc pertinent, voire essentiel, de penser ces interventions pour maximiser leur contribution au développement urbain durable.

De cette mise en contexte se dégagent les deux thèmes couverts dans la thèse, soit l'intégration des principes du développement durable à la pratique de l'ingénierie et la conception des systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées (SMAEU) selon ces principes. Le premier thème a été traité par l'analyse des principes pour l'ingénierie durable ainsi que par la synthèse des concepts, modèles et théories abordant les phénomènes socio-environnementaux selon une approche systémique. Il en a résulté une liste structurée de principes ainsi qu'un cadre conceptuel pour l'ingénierie durable. Les particularités de la conception durable, peu traitées dans la littérature, ont aussi été étudiées. Un processus intégré de conception durable pour l'ingénierie (PICDI) a été ensuite élaboré. Les tâches du PICDI couvrent six dimensions permettant de distinguer la conception durable de la conception conventionnelle.

Pour le second thème, le PICDI a été appliqué au projet de modernisation du SMAEU de Deauville, suite à l'évaluation de celui-ci dans sa configuration existante à l'aide de critères techniques et de développement durable. L'évaluation du SMAEU existant et des options envisagées pour sa modernisation ont reposé sur de nombreux outils, notamment l'analyse environnementale sur le cycle de vie (AECV), l'analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV) et la consultation des parties prenantes. D'après la revue de littérature ces outils sont peu appliqués à des SMAEU desservant des petites communautés et aucune étude recensée ne porte sur les technologies mobilisées par le SMAEU de Deauville pour la collecte et l'épuration des eaux usées. D'après l'AECV et l'ACCV du système existant, les principaux impacts environnementaux et coûts du système existant sont associés au réseau de collecte. Ce dernier engendre aussi les principales lacunes sur le volet social. Des résultats similaires ont été obtenus lors de l'évaluation des options considérées pour la modernisation du SMAEU de Deauville. L'utilisation du PICDI pour ce projet a permis l'atteinte de teintes acceptables ou élevées pour la plupart des dimensions de la conception durable. Toutefois, aucune des options envisagées ne permet des gains majeurs selon les trois volets du développement durable. Ainsi, une contribution accrue des SMAEU au développement urbain durable passe probablement par une refonte d'envergure majeure, permettant notamment la valorisation de l'énergie et des nutriments présents dans les eaux usées.

Mots-clés : Développement durable, ingénierie, conception, conception durable, assainissement des eaux usées, analyse du cycle de vie.

REMERCIEMENTS

Je désire tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Roland Leduc et mon co-directeur, Luc Savard, pour le support offert au cours de ces dernières années. Nos nombreuses discussions m'ont grandement aidé à naviguer dans les eaux troubles de la recherche multidisciplinaire. Je tiens aussi à remercier Olivier Thomas, directeur de l'Observatoire sur l'environnement et le développement durable au moment de l'amorce de mon parcours doctoral, pour les opportunités de collaboration.

Je remercie également l'ensemble des employés de la Ville de Sherbrooke qui ont su répondre à mes innombrables questions sur le système d'assainissement de Deauville, tout particulièrement André P. Robert, Luc Larrivée., Michel Cyr, Stéphane Simard., Stéphane Cotnoir et Simon Létourneau. Le projet de recherche n'aurait tout simplement pas été possible sans leur appui. De plus, je tiens à souligner l'appui technique de Ghita Ben El Houssain et Jean-Philippe Raboud chez Mabarex en ce qui concerne la technologie SMBR.

De nombreuses autres personnes, rencontrées dans un contexte académique ou professionnel, m'ont aidé à progresser dans mes travaux de recherche ou de manière plus générale, dans ma compréhension du vaste concept qu'est le développement durable. Je tiens notamment à souligner la contribution de Jean-Sébastien Trudel, Pascal Lesage., Charles Thibodeau, Thomas Fortin-Chevalier, Cynthia Martel et Nicolas Maheu-Giroux. Par leurs questions et commentaires éclairés, plusieurs étudiants rencontrés au fil des sessions m'ont aussi permis d'approfondir mes connaissances dans les domaines couverts par la présente recherche.

Il me serait impossible de passer sous silence la contribution de ma conjointe, Geneviève Marcoux, autant pour nos nombreux échanges sur la pratique de l'ingénierie que pour sa patience face à des travaux de recherche apparaissant par moment interminables. Je remercie aussi mon père, ma mère et ma sœur qui ont toujours cru en mes capacités et salué à maintes reprises ma persévérance. L'arrivée de mon premier fils constitue sans aucun doute le moment le plus inoubliable de mes années de doctorant et sa présence m'aide depuis plus de deux ans à oublier par instants les rigueurs de la recherche scientifique. Mon second fils est pour sa part arrivé à la toute fin de mon périple universitaire, me laissant à peine le temps de terminer la conclusion de ma thèse. De plus, mes amis proches, Éric, Patric, Vincent, Daniel, Karine, Joël et les deux Olivier, m'ont fréquemment aidé à décrocher pour simplement profiter du moment présent.

Finalement, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada et le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies pour leur aide financière.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Lexique.....	xv
Liste des acronymes.....	xvii
Chapitre 1 Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Définition du projet de recherche et des objectifs.....	4
1.3 Contributions de la recherche.....	5
1.4 Plan du document.....	6
Chapitre 2 Revue de littérature.....	7
2.1 Développement durable.....	7
2.1.1 Historique du développement durable.....	8
2.1.2 Facettes du développement durable.....	9
2.1.3 Principes du développement durable.....	11
2.2 Développement durable et ingénierie.....	12
2.3 Outils du développement durable pour l'ingénierie.....	14
2.3.1 Outils de pensée hétérodoxe.....	14
2.3.2 Outils d'analyse.....	16
2.3.3 Outils de synthèse et d'aide à la décision.....	29
2.3.4 Participation des parties prenantes.....	34
2.3.5 Récapitulation des outils recensés.....	35
2.4 Conception conventionnelle.....	37
2.5 Écoconception et conception durable.....	38
2.6 Conception durable de systèmes d'assainissement des eaux usées.....	40
2.6.1 Systèmes d'assainissement des eaux usées.....	40
2.6.2 SMAEU et enjeux relatifs au développement durable.....	42
2.6.3 Critères et indicateurs de développement durable pour les SMAEU.....	44
2.6.4 Conception et évaluation des SMAEU.....	46
2.6.5 Outils du développement durable appliqués aux SMAEU.....	47
Chapitre 3 Développement durable et ingénierie.....	51
3.1 Introduction.....	53
3.2 General principles of sustainable development.....	53
3.3 Sustainable development principles for engineering.....	58
3.4 Concepts and models relevant to environmental and social systems.....	62
3.5 General sustainability framework and its application to engineering.....	63
3.6 Discussion on the principles for sustainable engineering.....	67

3.7	Discussion on the use of the framework in engineering education and practice	69
3.8	Conclusions	72
Chapitre 4 Conception conventionnelle et durable.....		73
4.1	Introduction.....	75
4.2	Sustainable development and engineering.....	75
4.3	Literature review on engineering design	77
4.3.1	Conventional design process.....	77
4.3.2	Recent approaches in engineering design.....	80
4.3.3	Sustainable design process	83
4.3.4	Documentation of design processes and validation of design methods	87
4.4	Elaboration of an integrated sustainable design process	89
4.5	Shades of sustainability for engineering design	96
4.6	Discussion.....	102
4.7	Conclusions	104
Chapitre 5 Élaboration du cadre méthodologique.....		105
5.1	Développement durable et conception en ingénierie.....	105
5.1.1	Étape 1 : Analyser les interprétations du développement durable.....	106
5.1.2	Étape 2 : Élaborer un cadre conceptuel pour l'ingénierie durable.....	107
5.1.3	Étape 3 : Recenser les approches conventionnelles de conception	108
5.1.4	Étape 4 : Élaborer le processus intégré de conception durable	108
5.1.5	Étape 5 : Identifier les dimensions de la conception durable.....	108
5.2	Conception durable du SMAEU de Deauville.....	108
5.2.1	Étape 6 : Évaluer le système dans sa configuration actuelle.....	109
5.2.2	Étape 7 : Appliquer le PICDI au SMAEU de Deauville.....	120
5.2.3	Étape 8 : Évaluer la mise en œuvre du PICDI	134
Chapitre 6 Analyse du SMAEU de Deauville		135
6.1	Contexte québécois et canadien	135
6.2	SMAEU de Deauville	136
6.2.1	Configuration du SMAEU	139
6.2.2	Gestion et financement du SMAEU	143
6.2.3	Suivi technique du SMAEU	144
6.2.4	Suivi budgétaire du SMAEU	145
6.3	Analyse technique du SMAEU dans sa configuration actuelle	146
6.3.1	Analyse du réseau de collecte des eaux usées.....	147
6.3.2	Analyse de la station d'épuration.....	154
6.3.3	Analyse des boues d'épuration.....	159
6.3.4	Consultation des experts.....	162
6.3.5	Conclusions.....	163
6.4	Analyse de la durabilité du SMAEU dans sa configuration actuelle.....	164
6.4.1	Analyse environnementale du cycle de vie	164
6.4.2	Analyse des coûts sur le cycle de vie.....	175

6.4.3	Analyse de la valeur accordée aux biens et services environnementaux.....	179
6.4.4	Analyse distributionnelle.....	183
6.4.5	Consultation des parties prenantes.....	185
6.4.6	Sondage mené auprès des citoyens.....	186
6.4.7	Conclusions.....	188
Chapitre 7	Modernisation du SMAEU de Deauville	189
7.1	Définition du problème	189
7.1.1	Définition du problème et des objectifs.....	189
7.1.2	Élaboration des principes et du cadre conceptuel	190
7.1.3	Définition du contexte.....	190
7.1.4	Analyse des parties prenantes.....	191
7.1.5	Identification des enjeux associés au D.D.	193
7.1.6	Identification des contraintes	194
7.1.7	Identification des données de base.....	195
7.2	Étude conceptuelle.....	197
7.2.1	Définition des fonctions.....	197
7.2.2	Description d'une situation future durable.....	197
7.2.3	Définition des spécifications techniques et des critères.....	199
7.2.4	Génération des options.....	201
7.2.5	Choix des indicateurs et les outils de développement durable.....	204
7.2.6	Choix d'une approche d'aide à la décision.....	204
7.3	Conception préliminaire	205
7.3.1	Élaboration des concepts.....	205
7.3.2	Évaluation technique des concepts	212
7.3.3	Évaluation de la durabilité des concepts.....	215
7.3.4	Recommandation d'un concept.....	233
7.4	Conception détaillée.....	235
7.5	Dimensions de la conception durable	236
7.5.1	Processus de conception.....	237
7.5.2	Choix des enjeux.....	237
7.5.3	Choix des indicateurs	238
7.5.4	Choix des outils	239
7.5.5	Performance des options	241
7.5.6	Prise de décision.....	241
7.6	Retour sur la mise en œuvre du PICDI pour le SMAEU de Deauville	244
7.7	Freins et leviers selon les dimensions de la conception durable.....	249
Chapitre 8	Conclusion.....	257
8.1	Sommaire des travaux	257
8.2	Contributions originales	260
8.3	Perspectives de recherche	261
Annexe A	Principes du développement durable	265

Annexe B – Principes de l’ingénierie durable.....	277
Annexe C – Critères et indicateurs pour les SMAEU.....	285
Annexe D – Questionnaires pour l’évaluation du SMAEU existant.....	298
Annexe E – Questionnaires pour l’évaluation des contingences.....	309
Annexe F – Questionnaires pour l’évaluation des options pour la modernisation du SMAEU.....	319
Annexe G – Débits dans le réseau de collecte.....	345
Annexe H – Analyse technique du SMAEU existant.....	349
Annexe I – AECV (SMAEU existant).....	355
Annexe J – ACCV (SMAEU existant).....	371
Annexe K – Évaluation monétaire des biens et services environnementaux.....	373
Annexe L – Analyse distributionnelle.....	375
Annexe M – Enjeux de développement durable pour le SMAEU.....	377
Annexe N – Solutions identifiées lors de séances de créativité.....	381
Annexe O – Dimensionnement des options (réseau et station.....)	387
Annexe P – AECV (modernisation du SMAEU).....	397
Annexe Q – ACCV (modernisation du SMAEU).....	407
Annexe R – Indicateurs pour le suivi du SMAEU.....	409
Annexe S – Teintes de durabilité.....	411
Liste des références.....	413

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Représentations du concept de développement durable.....	10
Figure 2.2 Échelle d'évaluation de la grille d'analyse de la FIDIC [2005].....	27
Figure 2.3 Fonctions d'utilité linéaire pour la méthode SMART	31
Figure 2.4 Hiérarchisation des critères selon la méthode AHP	31
Figure 2.5 Catégorisation des outils recensés.....	36
Figure 2.6 Systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées	40
Figure 3.1 Categorization of the general principles reviewed	55
Figure 3.2 Proposed sustainable development principles (letters refer to Table 3.1)	56
Figure 3.3 Categorization of the sustainable engineering principles reviewed.....	60
Figure 3.4 Proposed sustainability principles for engineering (letters refer to Table 3.2)	61
Figure 3.5 Sustainability framework for engineering.....	65
Figure 4.1 Sustainable engineering principles adapted from Gagnon <i>et al.</i> [2009].....	77
Figure 4.2 Sustainability conceptual framework adapted from Gagnon <i>et al.</i> [2009]	90
Figure 4.3 Design stages and life cycle phases, inspired from Brent [2005]	95
Figure 5.1 Aperçu de la méthodologie développée.....	105
Figure 5.2 Arbre des processus typique, adapté de Jolliet <i>et al.</i> [2010].....	113
Figure 5.3 Types d'ACCV, adapté de Hunkeler <i>et al.</i> [2008].....	114
Figure 6.1 Emplacement du SMAEU à l'étude [Source : Google Maps].....	137
Figure 6.2 Division du territoire desservi en sous-bassins et localisation de la station	138
Figure 6.3 Réseaux séparatif et pseudo-séparatif [adapté de Brière, 2006].....	139
Figure 6.4 Configuration du réseau de collecte du SMAEU de Deauville.....	141
Figure 6.5 Schéma d'écoulement de la station d'épuration et dimensions des étangs.....	142
Figure 6.6 Débit horaire à l'affluent pour différentes conditions climatiques	148
Figure 6.7 Azote ammoniacal total et valeur aigüe finale à l'effluent entre 2006 et 2008.....	159
Figure 6.8 Bilan de masse sur les matières volatiles et fixes à la station d'épuration	161
Figure 6.9 Frontières du champ d'étude	165
Figure 6.10 Bilan sur le carbone pour les étangs aérés facultatifs	169
Figure 6.11 Bilan sur l'azote pour les étangs aérés facultatifs	169
Figure 6.12 Impacts environnementaux normalisés selon ReCiPe.....	172
Figure 6.13 Coûts sur cycle de vie en dollars constants (2008).....	177
Figure 6.14 Coûts sur le cycle de vie actualisés en dollars constants de 2008.....	178
Figure 6.15 Influence du taux d'actualisation sur les coûts sur le cycle de vie	179
Figure 6.16 Répartition des coûts actualisés sur 75 ans par quintiles	184
Figure 7.1 Zones prioritaires et zones de réserve pour le développement.....	191
Figure 7.2 Options pour la modernisation du réseau de collecte	201
Figure 7.3 Options pour la station d'épuration	203
Figure 7.4 Configuration du bassin de rétention	206
Figure 7.5 Transferts de chaleur dans les étangs aérés avec couverture isolante flottante.....	211
Figure 7.6 Frontières du champ d'étude pour l'AECV	216

Figure 7.7 Impacts normalisés pour le réseau selon ReCiPe	219
Figure 7.8 Impacts normalisés pour la station selon ReCiPe.....	220
Figure 7.9 Impacts pondérés pour les options combinées selon ReCiPe.....	221
Figure 7.10 Influence du mélange énergétique sur les impacts des options selon ReCiPe.....	222
Figure 7.11 Coûts de construction des options combinées	226
Figure 7.12 Valeur présente nette des options combinées	227
Figure 7.13 Lien entre les teintes de durabilité et la méthode SMART	241
Figure 7.14 Rétroaction entre les étapes du PICDI	249

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Outils de pensée hétérodoxe associés au développement durable.....	15
Tableau 2.2 Techniques en évaluation monétaire des biens et services environnementaux.....	21
Tableau 2.3 Calcul de l'indicateur sur la santé pour l'IDH.....	28
Tableau 2.4 Agrégation des résultats par la somme pondérée.....	30
Tableau 2.5 Processus de conception conventionnelle.....	38
Tableau 2.6 Processus d'écoconception.....	39
Tableau 2.7 Synthèse des processus de conception durables recensés.....	39
Tableau 2.8 Taille des SMAEU.....	41
Tableau 2.9 Critères et indicateurs pour les SMAEU.....	45
Tableau 2.10 Sommaire des études visant l'évaluation et la conception des SMAEU.....	46
Tableau 2.11 Modélisation de la valorisation des boues d'épuration en AECV.....	50
Table 3.1 General principles of sustainable development.....	54
Table 3.2 Sustainable engineering principles.....	58
Table 3.3 Concepts and models relevant to sustainable development, environment and society.....	62
Table 3.4 Relevance of the proposed sustainable engineering principles.....	68
Table 4.1 Conventional design processes.....	78
Table 4.2 Generic CDP tasks.....	79
Table 4.3 Sustainable engineering design processes (letters refer to Table 4.7).....	84
Table 4.4 General approaches to sustainable decision-making (letters refer to Table 4.7).....	85
Table 4.5 Tools for sustainable design processes.....	87
Table 4.6 Typical relationships between engineering projects and their global environment.....	91
Table 4.7 Integrated sustainable engineering design process (letters refer to Tables 3 and 4)....	93
Table 4.8 Categories of criteria considered in the ISEDP.....	96
Table 4.9 Dimensions and shades of sustainability for engineering design.....	99
Tableau 5.1 Cadre pour l'évaluation de la durabilité du SMAEU existant.....	112
Tableau 5.2 Valeur accordée aux biens et services environnementaux.....	116
Tableau 5.3 Application du PICDI au SMAEU de Deauville.....	121
Tableau 5.4 Critères et outils (technique et développement durable).....	123
Tableau 5.5 Échelle pour l'évaluation de la performance des solutions.....	125
Tableau 5.6 Description des étapes de la méthode SMART.....	128
Tableau 5.7 Pondérations et fonction linéaire pour les spécifications techniques.....	129
Tableau 5.8 Facteurs d'ajustement pour l'incertitude.....	130
Tableau 5.9 Pondérations et fonction pour les indicateurs environnementaux.....	131
Tableau 5.10 Pondérations et fonction pour les indicateurs économiques.....	132
Tableau 5.11 Pondérations et fonction pour les indicateurs sociaux.....	133
Tableau 5.12 Teintes pour l'application du PICDI.....	134
Tableau 6.1 Types de station d'épuration en opération au Québec en 2009.....	135
Tableau 6.2 Types de réseau présents dans le SMAEU de Deauville.....	141
Tableau 6.3 Population équivalente desservie par le SMAEU en 1989 et 2008.....	142

Tableau 6.4 Exigences de rejet pour le SMAEU de Deauville.....	143
Tableau 6.5 Calendrier annuel d'échantillonnage à l'effluent de la station d'épuration.....	145
Tableau 6.6 Activités associées à la construction du SMAEU	146
Tableau 6.7 Activités associées à l'opération du SMAEU	146
Tableau 6.8 Débordements aux ouvrages de surverse du réseau de collecte	147
Tableau 6.9 Synthèse des débits pour les années 2005 à 2008.....	151
Tableau 6.10 Débits pour le SMAEU de Deauville et débits typiques	151
Tableau 6.11 Débit de captage calculé et estimé selon les précipitations.....	153
Tableau 6.12 Événements retenus pour estimer la réduction du débit de captage.....	153
Tableau 6.13 Événements retenus pour estimer la réduction du débit de captage.....	154
Tableau 6.14 Caractéristiques moyennes de l'affluent pour la période 2003-2008.....	154
Tableau 6.15 DBO ₅ à l'effluent de la station entre 2003 et 2008.....	155
Tableau 6.16 Performance calculée et observée pour l'enlèvement de la DBO ₅ en 2006	156
Tableau 6.17 P _T et C.F. à l'effluent de la station entre 2003 et 2008	156
Tableau 6.18 DBO ₅ et MES à l'effluent sur une base trimestrielle de 2003 à 2008.....	157
Tableau 6.19 Limites pour l'azote ammoniacal total à l'effluent (Canada et Québec).....	158
Tableau 6.20 Résultats pour le bilan de masse sur les MVS et MNVS à la station d'épuration ...	162
Tableau 6.21 Résultats de la consultation des experts sur les critères techniques	162
Tableau 6.22 Commentaires sur l'évaluation technique par les experts.....	163
Tableau 6.23 Sources de données pour l'analyse de l'inventaire	166
Tableau 6.24 Distances et modes de transport considérées pour l'inventaire	167
Tableau 6.25 Mélanges énergétiques considérés pour l'inventaire	168
Tableau 6.26 Répartition des émissions carbonées	169
Tableau 6.27 Répartition des émissions azotées sans nitrification.....	170
Tableau 6.28 Répartition des émissions azotées avec nitrification.....	170
Tableau 6.29 Principaux processus contributeurs (méthode ReCiPe) avec le mélange NPCC....	173
Tableau 6.30 Principaux contributeurs (méthode ReCiPe) avec le mélange québécois	174
Tableau 6.31 Analyse de sensibilité (méthode ReCiPe) avec le mélange NPCC.....	174
Tableau 6.32 Sources de données pour l'ACCV	175
Tableau 6.33 Taux et indices pour les coûts futurs	176
Tableau 6.34 Distribution de l'âge et du revenu dans l'échantillon et la population	180
Tableau 6.35 Volonté de payer (\$/mois) pour les améliorations (collecte et plans d'eau).....	181
Tableau 6.36 Consentement à accepter (\$/mois) une interruption (collecte et épuration).....	181
Tableau 6.37 Modes de financement et coûts du SMAEU	183
Tableau 6.38 Caractéristiques moyennes des quintiles.....	184
Tableau 6.39 Évaluation des critères sociaux par les parties prenantes.....	185
Tableau 6.40 Commentaires des parties prenantes sur les critères sociaux.....	186
Tableau 6.41 Niveau de satisfaction face au réseau de collecte et à la qualité des plans d'eau ..	187
Tableau 6.42 Raisons d'insatisfaction pour le réseau de collecte et la qualité des plans d'eau..	187
Tableau 7.1 Analyse des parties prenantes primaires	192
Tableau 7.2 Analyse des parties prenantes secondaires.....	193

Tableau 7.3 Enjeux associés au développement durable pour le SMAEU	194
Tableau 7.4 Population actuelle et projetée pour le réseau de collecte.....	196
Tableau 7.5 Charges actuelles et projetées pour la station d'épuration	196
Tableau 7.6 Débits actuels et projetés pour la station d'épuration	196
Tableau 7.7 Fonctions principales et secondaires du SMAEU.....	197
Tableau 7.8 Caractéristiques des SMAEU durables	198
Tableau 7.9 Exigences de rejet projetées à la station	199
Tableau 7.10 Critères et enjeux de développement durable	200
Tableau 7.11 Combinaisons retenues pour le réseau de collecte et la station d'épuration.....	204
Tableau 7.12 Données pour le dimensionnement du bassin de rétention.....	205
Tableau 7.13 Équipements requis pour le débranchement des drains de fondation.....	206
Tableau 7.14 Performances avec l'étang aéré supplémentaire pour la DBO ₅	208
Tableau 7.15 Performances avec le bioréacteur pour la DBO ₅	210
Tableau 7.16 Températures hivernales dans les étangs isolés.....	211
Tableau 7.17 Performances avec l'isolation des étangs pour la DBO ₅	211
Tableau 7.18 Performance technique des options pour le réseau selon le groupe d'experts	213
Tableau 7.19 Commentaires sur l'évaluation technique par les experts pour le réseau	213
Tableau 7.20 Performance techniques des options pour la station par les experts	214
Tableau 7.21 Commentaires sur l'évaluation technique pour la station par les experts.....	214
Tableau 7.22 Performance techniques des combinaisons d'options (réseau et station).....	215
Tableau 7.23 Adaptation de l'analyse de l'inventaire du système existant.....	217
Tableau 7.24 Sources de données pour l'analyse de l'inventaire des nouvelles composantes ...	218
Tableau 7.25 Principaux processus contribuant aux impacts pour les options combinées	221
Tableau 7.26 Classement des options selon les teintes pour le volet environnemental.....	223
Tableau 7.27 Adaptation des coûts colligés pour le système existant.....	224
Tableau 7.28 Sources de données pour les coûts des nouvelles composantes.....	225
Tableau 7.29 Niveaux d'incertitude pour l'estimation des coûts.....	225
Tableau 7.30 Taux hypothécaires, d'actualisation et d'inflation retenus pour l'ACCV	226
Tableau 7.31 Influence du taux d'actualisation sur le coût des options combinées	228
Tableau 7.32 Estimation de l'incertitude sur le coût des options combinées	228
Tableau 7.33 Estimation des bénéfices issus de la valorisation des eaux usées	229
Tableau 7.34 Classement des options selon les teintes pour le volet économique	230
Tableau 7.35 Comparaison de la volonté de payer avec les coûts de la modernisation.....	230
Tableau 7.36 Évaluation des critères sociaux pour le réseau	231
Tableau 7.37 Commentaires sur l'évaluation des critères sociaux pour le réseau.....	231
Tableau 7.38 Évaluation des critères sociaux pour la station	232
Tableau 7.39 Commentaires sur l'évaluation des critères sociaux pour la station	232
Tableau 7.40 Évaluation des critères sociaux pour les options combinées	233
Tableau 7.41 Profil normalisé des options combinées selon les quatre volets.....	233
Tableau 7.42 Teintes pour le processus de conception	237
Tableau 7.43 Teintes pour le choix des enjeux.....	237

Tableau 7.44 Teintes pour le choix des indicateurs	238
Tableau 7.45 Commentaires sur les teintes pour le choix des indicateurs.....	238
Tableau 7.46 Teintes générales pour le choix des outils.....	239
Tableau 7.47 Teintes pour les indicateurs et les outils.....	240
Tableau 7.48 Teintes pour la performance des options	241
Tableau 7.49 Teintes pour la prise de décision.....	242
Tableau 7.50 Coûts actualisés sur une période de 20 ans pour les options combinées.....	242
Tableau 7.51 Résultats agrégés selon une pondération accrue pour le volet économique	243
Tableau 7.52 Résultats agrégés selon une pondération égale pour tous les volets	243
Tableau 7.53 Applicabilité du PICDI – Planification et définition du problème	245
Tableau 7.54 Applicabilité du PICDI – Étude conceptuelle	246
Tableau 7.55 Applicabilité du PICDI – Conception préliminaire.....	248

LEXIQUE

Assèchement : Processus thermique permettant d'augmenter la teneur en matières solides des boues d'épuration déshydratées par l'évaporation de l'eau.

Cadre conceptuel : Représentation d'un phénomène ou d'un ensemble de phénomènes qui incorpore de nombreux concepts et articule ceux-ci de façon logique.

Capacité de support des écosystèmes : Pression maximale qui peut être exercée par une population sur un écosystème sans porter atteinte à l'intégrité de celui-ci.

Concept : Idée plus ou moins abstraite, un symbole qui désigne ou représente une réalité plus ou moins vaste et qui possède une signification générale pour un ensemble de représentations concrètes.

Critère : Dimension selon laquelle il est possible d'ordonner une gamme de concepts de manière à en faciliter leur évaluation et la prise de décision

Déshydratation : Processus physique permettant d'augmenter la teneur en matières solides des boues d'épuration épaissies (filtres à bandes presseuses, lits de séchage, centrifugation). La déshydratation est facilitée par l'ajout de polymères aux boues épaissies.

Enjeu : Aspect ou caractéristique d'une activité en lien avec un ou plusieurs principes du développement durable.

Épaississement : Processus physique permettant d'augmenter la teneur en matières solides des boues d'épuration extraites des bassins de traitement (sédimentation, flottation à air dissous, centrifugation).

Équité procédurale : Prise de décision à l'aide d'une procédure équitable et ouverte, adaptée au type de décision et à son contexte, comprenant la possibilité donnée aux personnes visées par la décision de présenter leurs points de vue.

Indicateur : Paramètre mesurable, quantitatif ou qualitatif, permettant d'évaluer la performance d'une gamme de concepts selon un critère.

Modèle : représentation simplifiée d'un phénomène n'incluant que les concepts jugés pertinents à sa compréhension et décrivant comment ceux-ci sont reliés.

Principe : Proposition fondamentale qui découle des valeurs du développement durable et qui sert à guider les actions ou la conduite.

Résilience : Capacité qu'a un écosystème, une communauté, une société ou tout autre type de système de résister ou de changer suite à des perturbations afin d'arriver à un niveau de fonctionnement et de structures acceptable.

Système : Ensemble d'interactions entre différents éléments, qui perdurent dans le temps, ce qui permet de distinguer le système de son environnement extérieur, mais dont la nature varie, ce qui confère au système un statut dynamique et adaptatif.

Théorie : Ensemble de proposition logiquement reliées, encadrant des faits observés et formant un réseau de généralisation dont on peut dériver des explications pour un certain nombre de phénomènes.

Utilité : Capacité que possède une chose de remplir une fonction souhaitée par un individu ou une organisation.

LISTE DES ACRONYMES

ACCV : Analyse des coûts sur le cycle de vie
AECV : Analyse environnementale du cycle de vie
ASCV : Analyse sociale du cycle de vie
CCME : Conseil canadien des ministres de l'environnement
C.F. : Coliformes fécaux
CMED : Commission mondiale sur l'environnement et le développement
CSA : Association canadienne de normalisation
DBO₅ : Demande biochimique en oxygène sur 5 jours
DCO : Demande chimique en oxygène
ÉES : Évaluation environnementale stratégique
ÉIE : Étude d'impact sur l'environnement
ÉIS : Évaluation des impacts sociaux
FIDIC : Fédération internationale des ingénieurs-conseils
ICI : Industries, commerces et institutions
IDH : Indice de développement humain
ISO : Organisation internationale de normalisation
MAMROT : Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
MDDEP : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MES : Matières en suspension
NTK : Azote total Kjeldahl
OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques
OIQ : Ordre des ingénieurs du Québec
OQADD : Outils de questionnement et d'analyse en matière de développement durable
PADEM : Programme d'assainissement des eaux municipales
PAEQ : Programme d'assainissement des eaux du Québec
PCC : Processus de conception conventionnelle
PICDI : Processus intégré de conception durable pour l'ingénierie
PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement
RSE : Responsabilité sociale de l'entreprise
SMAEU : Système municipal d'assainissement des eaux usées
SMART : *Simple Multi-Attribute Rating Technique*
SQAE : Société québécoise d'assainissement des eaux

Chapitre 1 INTRODUCTION

La présente recherche couvre deux principaux thèmes, soit l'intégration des principes du développement durable à la pratique de l'ingénierie et la conception des systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées (SMAEU) selon ces principes. Les deux thèmes sont complémentaires : le premier touche l'ensemble des disciplines du génie tandis que le second, plus ciblé, illustre comment la conception durable peut être mise en œuvre par l'intermédiaire d'une étude de cas dans le domaine de l'assainissement des eaux usées.

1.1 Mise en contexte et problématique

Le contexte dans lequel les ingénieurs évoluent a beaucoup changé au cours des deux dernières décennies, période au cours de laquelle le concept de développement durable s'est implanté dans l'ensemble de la société. De nombreuses organisations telles les États, les villes, les entreprises et les universités, désirent désormais orienter leurs activités pour s'inscrire dans un développement dit plus durable. Bien que sujet à interprétation, ce dernier s'oriente autour de trois axes, soit l'intégrité environnementale, l'équité sociale et l'efficacité économique. En tant qu'employés de telles organisations ou sur la base de leur responsabilité professionnelle, les ingénieurs sont appelés à modifier leurs pratiques pour les rendre compatibles avec la notion de développement durable. Comme les projets placés sous la responsabilité des ingénieurs recèlent de nombreux défis techniques et doivent respecter des contraintes économiques à court terme, il devient ardu de considérer en parallèle les enjeux liés au développement durable. De plus, la très grande majorité des ingénieurs actuellement sur le marché du travail n'ont pu aborder cette problématique durant leur parcours universitaire ou par la formation continue.

L'intérêt croissant envers une nouvelle façon de pratiquer l'ingénierie, conforme aux principes du développement durable, est à la source d'une imposante littérature. Plusieurs organisations d'ingénieurs à travers le monde ont reconnu l'importance que revêtent les enjeux du développement durable pour l'avenir de la profession. Certaines ont clairement pris position en énonçant des principes ou des lignes directrices, tandis que d'autres offrent à leurs membres un soutien plus concret à l'aide de guides. Au Canada, le *Guide national sur l'environnement et le développement durable* [Conseil canadien des ingénieurs, 2006] constitue la principale référence en la matière. Des organisations provinciales, incluant l'Ordre des ingénieurs du Québec, reconnaissent le rôle que peut jouer l'ingénierie dans l'atteinte d'un développement plus durable, sans avoir formulé à ce jour de recommandations détaillées pour la pratique professionnelle.

Un nombre élevé de processus de conception, de méthodes d'aide à la décision, de principes, de critères, d'indicateurs et d'outils ont également été proposés au fil des années. Même si la conception durable apparaît désormais comme une approche relativement bien définie, les différences fondamentales existant entre l'ingénierie conventionnelle et durable n'ont encore pas été identifiées de manière explicite. En effet, parmi les références portant sur le processus de conception durable pour les projets d'ingénierie mentionnées à la section 4.3.3, aucune ne pose clairement comment celle-ci se distingue de la conception conventionnelle. De plus, il n'est pas clair quelles pratiques font consensus et comment celles-ci peuvent être intégrées au processus de conception. En parallèle, les méthodes recensées sont issues de diverses disciplines, ce qui rend parfois plus difficile leur utilisation par les ingénieurs. Ceci explique, du moins en partie, pourquoi la prise en compte structurée et systématique des principes du développement durable dans la pratique de l'ingénierie est si peu répandue aujourd'hui. Cette segmentation apparaît clairement dans la revue de littérature : à l'exception du processus de conception durable SWARD [Ashley et al. 2008], les principes (section 3.3) sont traités indépendamment du processus de conception (section 4.3.3), des critères (section 2.6.3) et des outils (section 2.6.5).

Le domaine du génie de l'environnement, auquel se rattache l'assainissement des eaux usées, occupe une position particulière face à ce que l'on peut appeler l'ingénierie durable. Comme ce domaine traite des préoccupations environnementales locales ou régionales, il se trouve donc en lien direct avec le pilier environnemental du développement durable. Toutefois, en génie de l'environnement, tout comme dans les autres champs de l'ingénierie, une foule d'enjeux environnementaux, sociaux et économiques doivent être pris en compte. Paradoxalement, un accent trop prononcé sur des problématiques environnementales peut amener la mise en exergue des autres dimensions et entraver cette intégration.

Au Québec, les infrastructures municipales d'assainissement des eaux usées ont en grande partie été construites au cours des années 1980 et 1990 [MAMROT, 2010]. Sous l'effet conjugué du développement urbain et du vieillissement des équipements, plusieurs de ces systèmes devront prochainement être modernisés ou remplacés. Une stratégie pancanadienne a d'ailleurs été adoptée en 2009 par le Conseil canadien des ministres de l'environnement à cet effet. Le respect des normes énoncées dans cette stratégie nécessitera des investissements d'environ 6 milliards de dollars dans les stations d'épuration au cours des 30 prochaines années [Environnement Canada, 2010a]. Des investissements majeurs seront également nécessaires pour réduire

l'occurrence des débordements d'eaux usées non traitées [Environnement Canada, 2010a] et pour maintenir l'intégrité des réseaux de collecte dans le futur [Coalition pour le renouvellement des infrastructures du Québec, 2006]. Même si le parc d'infrastructures exploité par les municipalités n'a pas initialement été conçu selon l'ingénierie durable, il serait préférable que leur renouvellement ou leur mise aux normes s'inspire d'une telle approche. L'examen des diverses avenues envisageables pour l'optimisation des installations existantes pourrait par exemple révéler que celles-ci offrent peu de gains satisfaisants en matière de développement durable. Des changements radicaux seraient alors nécessaires à plus long terme pour assurer un assainissement des eaux usées compatible avec un développement urbain durable.

Alors que les principes fondamentaux du développement durable s'appliquent à l'ensemble des activités humaines, les différents champs de l'ingénierie sont tous aux prises avec des enjeux qui leur sont propres. Les spécificités du secteur de l'assainissement des eaux usées ainsi que l'élaboration de solutions alternatives plus durable dans ce domaine sont explorés en recherche depuis plusieurs années. Toutefois, les études recensées à la section 2.6 portent en grande majorité sur un seul sous-système (la collecte, l'épuration ou le traitement des boues) et ne couvrent pas les SMAEU dans leur entier. De plus, la plupart de ces études insistent sur un ou quelques outils d'analyse, ce qui fait que tous les volets du développement durable ne sont pas traités avec la même profondeur. Les systèmes implantés dans les petites communautés, comme celui visé par l'étude de cas, sont rarement traités dans la littérature, contrairement à ceux desservant les grandes villes ou les résidences isolées.

Quelle que soit l'envergure du système, le problème se pose différemment si de nouvelles infrastructures doivent être mises en place ou s'il existe déjà des infrastructures relativement récentes et fonctionnelles. Dans la seconde situation, le coût de remplacement des infrastructures est si élevé qu'il est souvent avantageux de moderniser les installations existantes. Les interventions doivent toutefois être compatibles avec les équipements en place, ce qui limite l'éventail des solutions pouvant être envisagées. Évidemment, cette contrainte n'est pas rencontrée lorsqu'un nouveau système d'assainissement doit être construit en entier. La très grande majorité des municipalités québécoises disposent désormais d'infrastructures d'assainissement. Vu l'âge moyen de ces infrastructures, l'augmentation de leur capacité ou de leur niveau performance sont fréquemment nécessaires. Parmi l'ensemble des systèmes d'assainissement en place au Québec, près de 80% desservent des petites ou des très petites

communautés [MAMROT, 2010]. Ces constats illustrent bien la pertinence de réaliser l'étude de cas sur un système implanté dans une petite communauté dont la modernisation est envisagée.

1.2 Définition du projet de recherche et des objectifs

De la mise en contexte se dégage clairement l'utilité sociale de la présente recherche. D'une part, l'intégration des principes du développement durable à la pratique de l'ingénierie est une priorité pour de nombreuses organisations. D'autre part, l'étude de cas porte sur une situation fréquemment rencontrée au Québec dans le domaine de l'assainissement des eaux usées, soit celle de la modernisation d'un système desservant une petite communauté.

De la problématique exposée à la section 1.1 émerge également l'intérêt scientifique du projet de recherche. Il y est en effet soulevé que les différences entre la conception conventionnelle et la conception durable n'étaient pas encore identifiées. En effet, parmi les références portant sur les processus de conception durable pour l'ingénierie mentionnées à la section 4.3.3, aucune ne met en évidence les différences avec la conception conventionnelle. Il a aussi été mentionné que la mise en œuvre des nombreux principes, outils et critères de développement durable dans le processus de conception en ingénierie n'avait pas été étudié de manière détaillée. En dernier lieu, les évaluations du développement durable recensées dans le domaine de l'assainissement des eaux usées portaient la plupart du temps sur un sous-système spécifique et étaient réalisées dans le contexte des grandes communautés ou des résidences isolées. Deux questions tirées de la problématique viennent définir le projet de recherche :

- Qu'est-ce qui différencie la conception conventionnelle de la conception durable ?
- Est-ce que les options actuellement disponibles pour la modernisation des systèmes d'assainissement des eaux usées dans les petites communautés sont suffisamment en accord avec les principes du développement durable ?

Ces questions de recherche seront traitées par l'intermédiaire de trois objectifs principaux, se déclinant chacun en deux objectifs secondaires.

Objectif 1. Proposer un processus de conception durable pour la réalisation de projets en ingénierie.

- Construire un cadre conceptuel permettant de situer les projets dans leur contexte environnemental et social.
- Définir la place des outils de développement durable dans le processus de conception.

Objectif 2. Proposer une approche permettant aux ingénieurs d'évaluer leur progression vers la conception durable.

- Identifier les dimensions distinguant la conception conventionnelle et la conception durable.
- Définir les teintes existant entre la conception conventionnelle et la conception durable selon chacune des dimensions.

Objectif 3. Appliquer le processus de conception durable et évaluer le progrès vers la conception durable à l'aide d'une étude de cas sur un SMAEU desservant une petite communauté.

- Évaluer la performance des options envisagées pour la modernisation du système à l'étude selon des critères de développement durable.
- Identifier les freins et les leviers à la conception durable.

1.3 Contributions de la recherche

Les contributions originales des travaux de recherche sont multiples. Tout d'abord, un cadre conceptuel situant les projets d'ingénierie dans leur contexte environnemental et social est proposé pour faciliter leur analyse (section 3.5). Ce cadre conceptuel, qui a la particularité d'être basé sur une approche systémique, complète les principes de l'ingénierie durable faisant l'objet d'un consensus dans la littérature. Le cadre est particulièrement exhaustif car il prend en compte une large gamme de concepts, modèles et théories issues des sciences naturelles et humaines. Un processus intégré de conception durable pour l'ingénierie (PICDI), dans lequel les outils de développement durable recensés à la section 2.3 se positionnent clairement, est aussi proposé. Le PICDI, qui bâtit sur les récentes approches en conception durable, se distingue des autres processus recensés à la section 4.3.3 car il permet de différencier la conception durable de la conception conventionnelle grâce à six dimensions bien définies. En effet, les teintes permettant de situer un projet d'ingénierie entre la conception conventionnelle et la conception durable sont proposées à la section 4.5 pour chacune de ces dimensions.

L'évaluation du SMAEU de Deauville dans sa configuration existante mobilise de nombreux outils de développement durable dans un contexte original, c'est-à-dire l'analyse simultanée de tous les sous-systèmes d'un SMAEU desservant une petite communauté. Pour le SMAEU, les phases du cycle de vie auxquelles sont associées la majeure partie des impacts environnementaux et des coûts sont identifiées, respectivement par l'analyse environnementale du cycle de vie et l'analyse des coûts sur le cycle de vie. Fait rare dans la littérature recensée, de nombreux autres facteurs

sont aussi caractérisés, incluant la distribution des coûts entre les ménages desservis et la valeur accordée par les citoyens aux services rendus par le SMAEU. Finalement, le processus de conception durable est utilisé pour la modernisation du SMAEU de Deauville dans le but d'illustrer son applicabilité. L'ensemble des dimensions sont évaluées selon les teintes proposées à la section 4.5 pour un projet de conception réel. Ceci a notamment permis d'estimer la contribution potentielle au développement durable d'une gamme d'options applicables à la modernisation d'un bon nombre de SMAEU desservant des petites communautés québécoises. En dernier lieu, plusieurs freins et leviers à la conception durable identifiés lors de l'étude de cas ont la particularité de se situer hors du contrôle direct de l'équipe de conception.

1.4 Plan du document

Le chapitre 2 suit l'introduction et porte sur la revue de littérature. De par sa nature, le développement durable est un sujet vaste et complexe. L'état de l'art permet donc de positionner celui-ci dans le contexte de l'ingénierie et de faire le survol des outils proposés pour faciliter sa mise en œuvre. Le chapitre 3 reprend l'article *Sustainable Development in Engineering: A Review of Principles and Definition of a Conceptual Framework* publié dans *Environmental Engineering Science*. Une portion de la revue de littérature sur l'ingénierie et le développement durable est présentée dans cet article. L'élaboration du cadre conceptuel y est aussi abordée. Le chapitre 4 correspond à l'article *From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability* publié dans le *Journal of Engineering Design*. Ce second article comprend la revue de littérature sur la conception conventionnelle et durable, puis présente le PICDI ainsi que les dimensions de la conception durable. Les chapitres 3 et 4 viennent répondre à la première question de recherche et touchent l'ingénierie dans son ensemble. L'application de la conception durable à la modernisation du SMAEU à l'étude est exposée aux chapitre suivants.

Le cadre méthodologique est décrit au chapitre 5, ce qui permet de détailler comment certains approches présentées aux chapitres précédents sont mises en œuvre. Vient ensuite le chapitre 6, où sont tout d'abord présentées les principales composantes du SMAEU à l'étude. L'évaluation du système dans sa configuration actuelle selon les aspects techniques et du développement durable y est par la suite réalisée. Dans le chapitre 7 est exposée l'application du processus de conception durable au système à l'étude. La mise en œuvre de la conception durable s'accompagne de l'évaluation des teintes selon les dimensions définies au chapitre 4 ainsi que d'une discussion sur le PICDI. La thèse se termine par la conclusion et les parties finales.

Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Depuis l'émergence du concept de développement durable, une abondante littérature s'est progressivement construite autant sur ses fondements éthiques que sur ses outils ou ses applications. Après une brève mise en contexte sur l'historique et les principes du développement durable, une attention particulière est vouée aux applications propres au domaine de l'ingénierie. Sont abordés, dans l'ordre, les principes de l'ingénierie durable, les outils du développement durable pour l'ingénierie et la conception durable.

2.1 Développement durable

Les délibérations sur la signification du développement durable sont indissociables des diverses interprétations du terme développement proposées au fil des années. Selon plusieurs, la croissance économique (à l'échelle nationale) ou l'augmentation du revenu disponible (à l'échelle individuelle) ne peuvent à elles seules expliquer le développement ou le bien-être [Costanza *et al.*, 2007]. La qualité de vie reposerait plutôt sur la satisfaction d'une vaste gamme de besoins, incluant la subsistance, la protection, l'affection, la participation, la créativité, etc. Dans une perspective semblable, Sen [1999] définit le développement comme une expansion des libertés réelles dont les individus peuvent bénéficier. Les libertés dont un individu dispose dépendent de capacités¹ (santé physique, éducation, liberté d'expression, versement d'un revenu, etc.) lui permettant de réaliser divers fonctionnements² (avoir un emploi, influencer les politiques et programmes gouvernementaux, acheter des biens et services, etc.). Ainsi, le développement économique n'est qu'une composante parmi plusieurs autres contribuant à accroître la qualité de vie ou à la satisfaction de vivre. Le développement durable est habituellement associé aux interprétations du développement qui dépassent les seules considérations économiques et qui se veulent plus inclusives. L'adhésion au développement durable découle également d'un raisonnement éthique accordant priorité à certaines valeurs dont les principales sont l'équité intergénérationnelle et l'équité intragénérationnelle.

L'équité intragénérationnelle concerne la distribution des richesses ou des opportunités entre les individus ou les peuples. Celle-ci est l'objet de réflexions depuis plusieurs décennies, que ce soit en économie par la branche de l'économie du bien-être, ou en philosophie notamment par John

¹ Les capacités regroupent à la fois les ressources, compétences et opportunités sociales que les individus peuvent mobiliser afin d'adopter le mode de vie de leur choix.

² Les fonctionnements s'expriment sous la forme de réalisations concrètes, rendues possibles grâce aux capacités dont dispose un individu.

Rawls, auteur de la *Théorie de la justice*. L'œuvre de Rawls se situe dans la lignée du contractualisme et se rattache à celles de philosophes du 18^e siècle tels Rousseau et Kant. Selon Rawls [1997], un contrat social juste repose sur l'égalité des chances et est garanti par un éventail de droits le plus large possible et identique pour tous. L'équité intergénérationnelle est pour sa part associée aux répercussions des activités humaines sur le bien-être des générations futures. Celle-ci complète l'équité intragénérationnelle en intégrant la dimension temporelle et se base sur l'impératif écologique du philosophe Hans Jonas [1991]: « Agis toujours de telle sorte qu'une vie authentiquement humaine soit toujours possible dans l'avenir.» Les travaux de Jonas, comme ceux de Rawls, font référence au concept d'impératif catégorique développé par Kant et qui consiste en l'accomplissement du devoir guidé par une obligation morale universelle.

2.1.1 Historique du développement durable

Le développement durable se situe au carrefour de nombreux mouvements sociaux, ceux-ci ayant tous contribué à l'évolution du concept. L'origine du concept est difficile à retracer car ses racines se trouvent dans plusieurs disciplines. L'environnementalisme des années 1960 et 1970 initie néanmoins le mouvement devant mener à sa reconnaissance publique. Celui-ci émerge au moment où le monde connaît une croissance économique sans précédent. À titre d'exemple, le produit national brut (PNB) du Canada est passé (en dollars constants de 1990) de 102 milliards \$US en 1950 à 332 milliards \$US en 1975 puis à 699 milliards \$US en 2000 [The Conference Board, 2011]. La croissance d'après-guerre a toutefois imposé une forte pression sur les écosystèmes, autant dans les pays capitalistes que socialistes. La prise de conscience des impacts environnementaux découlant de cette croissance se cristallise dans des ouvrages tels que *Silent Spring* [Carson, 1963] et *Halte à la croissance* [Meadows et al., 1972].

La Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain tenue à Stockholm en 1972 constitue un jalon important, car cette rencontre d'envergure internationale a permis de traiter conjointement la dégradation de l'environnement ainsi que le développement économique et social. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a été fondé suite à cette conférence. C'est également au cours des années 1970, puis des années 1980, que les liens entre les activités humaines et les pluies acides, l'appauvrissement de la couche d'ozone, les changements climatiques et d'autres problèmes environnementaux apparaissent clairement. Au milieu des années 1970, Stivers [1976] envisage déjà l'avènement d'une « société durable » où le développement social et la protection de l'environnement apparaissent comme des objectifs légitimes, au même titre que la croissance économique. C'est en 1980 qu'apparaît dans la

Stratégie mondiale de conservation la première définition du développement durable [IUCN, 1980] : « Un type de développement qui prévoit des améliorations réelles de la qualité de la vie des hommes et en même temps conserve la vitalité et la diversité de la Terre. »

La création en 1983 de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED) s'est avéré être l'élément déclencheur de l'émergence du développement durable en tant que concept internationalement reconnu. Les travaux de la Commission, Mme Brundtland, ont mené à la publication en 1987 du rapport *Notre avenir à tous*. Ce dernier met en évidence les liens existant entre développement économique, qualité de l'environnement, climat social et qualité de vie, autant pour les pays riches que pour les pays en voie de développement. Dans la foulée du rapport Brundtland se tient en 1992 la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, aussi connue sous le nom de Sommet de la Terre. On en retient surtout la Déclaration de Rio, énonçant 27 principes du développement durable, ainsi que Agenda 21, plan d'action en 40 chapitres visant l'atteinte d'un développement plus durable à l'échelle mondiale. En 2002, lors du Sommet mondial sur le développement durable de Johannesburg, est dressé un bilan mitigé de la mise en œuvre d'Agenda 21. L'importance d'une action concertée y est alors réitérée et les enjeux sociaux et économiques sont intégrés aux problématiques environnementales de manière plus poussée qu'au Sommet de la Terre.

2.1.2 Facettes du développement durable

La définition la plus reconnue du développement durable est celle proposée par la CMED : « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » [CMED, 1988]. La CMED poursuit en ajoutant : « Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de besoins, et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale imposent sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. »

Plusieurs autres redéfinitions ont été proposées au fil des années; Pezzey [1992] en recensait déjà plus d'une centaine en 1992. Soulignons, entre autres, celle de O'Brien *et al.* [1996] qui fait explicitement référence aux trois dimensions du développement durable. Celui-ci se traduirait « par une organisation des activités humaines qui respecte les limites écologiques et thermodynamiques de la planète, qui est techniquement et économiquement viable et qui répond aux besoins et aux attentes de la population. » Keiner [2004] enrichit les définitions

précédentes en y ajoutant la notion d'évolutionnabilité. Selon lui, le développement évolutionnable « satisfait les besoins de la génération présente et augmente les capacités des générations futures à assurer leur bien-être en leur permettant de répondre à leurs besoins sans être limités par les fardeaux hérités du passé. » Selon cette interprétation, chaque génération doit laisser un héritage positif aux générations suivantes, leurs donnant ainsi la possibilité de bénéficier de conditions de vie toujours plus satisfaisantes.

Le caractère multidimensionnel du développement durable peut être représenté de plusieurs façons. Le schéma le plus connu, celui des trois piliers, est montré à la figure 1a. Il est composé de trois ensembles représentant chacune des dimensions du développement durable. Dans ce schéma, le développement durable est représenté par l'intersection des trois ensembles, soit l'endroit où les trois dimensions sont considérées de manière égale et simultanée. Le modèle de la bioéconomie (figure 1b) a été proposé par Passet [1996] pour mieux symboliser la dépendance des activités sociales par rapport à l'environnement et la dépendance des activités économiques par rapport au contexte social dans son ensemble. Dans ce modèle, les trois piliers sont représentés par des systèmes emboîtés plutôt que par des ensembles.

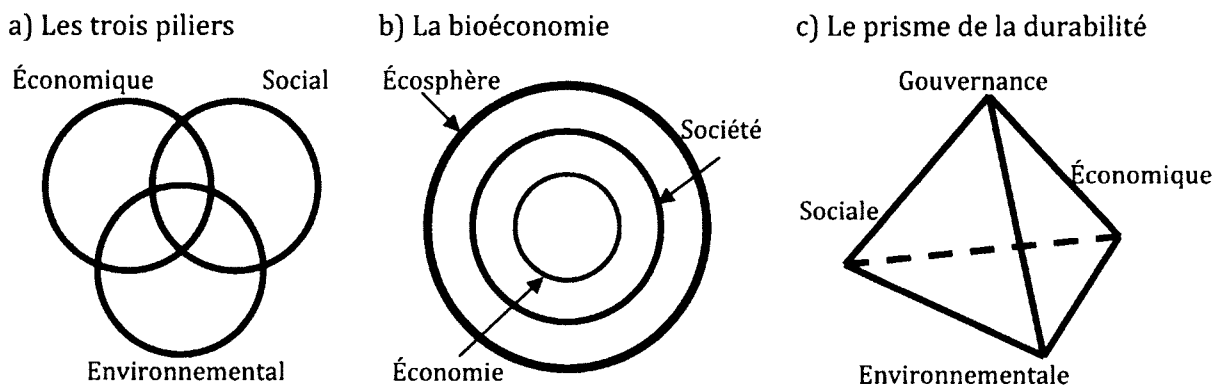


Figure 2.1 Représentations du concept de développement durable

Un autre modèle, celui du prisme de la durabilité [Valentin et Spangenberg, 2000], est illustré à la figure 1c. Dans cette représentation s'ajoute une dimension au sommet du prisme, soit celle de la gouvernance, aussi nommée dimension institutionnelle. Gendron [2007] propose pour sa part une hiérarchisation des dimensions du développement durable. Ainsi, la préservation de l'environnement serait une condition et l'efficacité économique un moyen d'atteindre l'objectif primordial que constitue le développement individuel et social.

La dimension environnementale du développement durable est celle ayant reçu à ce jour le plus d'attention. À la section 2.1.1 est mentionnée l'importance qu'a eu le mouvement environnemental dans l'émergence de ce concept. Depuis, certains principes clés à la durabilité environnementale ont été proposés. Lawn [2004] en fait la synthèse selon quatre axes: (1) le taux d'extraction des ressources renouvelables ne doit pas excéder leur taux de régénération; (2) l'épuisement des ressources non-renouvelables doit être compensé en investissant dans le développement de substituts renouvelables; (3) le taux de génération de déchets ne doit pas excéder la capacité des écosystèmes à les assimiler; et (4) la végétation indigène et les écosystèmes de grande valeur doivent être préservés, réhabilités ou restaurés.

La dimension sociale est souvent perçue comme étant la plus difficile à cerner. D'après Littig et Griebler [2005] la durabilité sociale est assurée si le travail, ainsi que les arrangements institutionnels qui y sont reliés, satisfont une gamme étendue de besoins et sont structurés de façon à assurer la justice sociale, la dignité humaine et la participation. De façon complémentaire, Folladori [2005] insiste sur l'importance de la participation à la prise de décisions et au renforcement des capacités des individus. Il souligne toutefois que les gains seront limités si les structures sociales perpétuent les inégalités sociales et l'exclusion. La dimension institutionnelle traite pour sa part des interactions qui existent entre les institutions et les membres de la société, en portant une attention particulière aux processus décisionnels et à l'application des décisions [Spangenberg, 2004]. Quatre principaux thèmes reflètent la durabilité institutionnelle selon cet auteur : (1) le niveau de décentralisation et d'imputabilité; (2) les politiques publiques et l'autonomisation de la société civile; (3) l'éducation et la recherche; et (4) l'équité entre les sexes.

Les travaux sur le développement économique durable mettent en évidence l'importance du capital naturel, social et humain, en plus du capital financier et fabriqué [Neumayer, 2003]. En ce qui concerne le système économique à proprement dit, Spangenberg [2005] a proposé que celui-ci devrait posséder les trois caractéristiques suivantes: (1) une diversité dans les structures économiques et les technologies employées; (2) des échanges équilibrés avec les autres économies avec lesquelles une région interagit; ainsi que (3) la valorisation du potentiel innovateur pour renforcer l'adaptabilité.

2.1.3 Principes du développement durable

Les principes du développement durable recensés dans la littérature sont présentés puis analysés à la section 3.2 grâce à l'analyse de contenu thématique, une méthode qualitative. La

synthèse des 212 principes recensés dans 14 références a mené à l'identification de 15 principes clés répartis selon les trois dimensions du développement durable. L'ensemble des principes recensés sont énumérés, catégorisés et synthétisés à l'annexe A. Bien que le développement durable soit un concept établi, il demeure en constante évolution. Son appropriation par de multiples acteurs a ainsi favorisé l'apparition d'interprétations tantôt complémentaires, tantôt contradictoires [Redclift, 2005]. Les multiples initiatives en matière de développement durable observées à travers le monde depuis les années 1990 alimentent néanmoins la réflexion critique autour de la pertinence du concept ainsi que de son utilisation appropriée.

L'intégration progressive des principes du développement durable au fonctionnement de ces organisations témoigne de la popularité croissante du concept. La multiplication de telles initiatives contraste avec les progrès mitigés ou les reculs observés dans plusieurs dossiers liés au développement durable, soit l'érosion de la biodiversité [Vié *et al.*, 2009], la stagnation de la satisfaction de vivre dans les pays développés [The Conference Board of Canada, 2009], les difficultés rencontrées dans l'atteinte des objectifs du millénaire pour le développement [Nations Unies, 2010], la croissance des émissions mondiales de gaz à effet de serre sans [GIEC, 2007], etc. Cette situation alimente d'une part le scepticisme envers la pertinence même du concept du développement durable, mais démontre d'autre part l'importance de remodeler en profondeur les modes de production et de consommation ainsi que la gouvernance des institutions [Redclift, 2005]. Il apparait ainsi crucial que la somme des actions menées dans les organisations contribue à des transformations notables à l'échelle de la société. Évidemment, l'ampleur de ce défi est phénoménale et requiert l'apport de tous les domaines, incluant celui de l'ingénierie.

2.2 Développement durable et ingénierie

Une vaste gamme de principes pour l'ingénierie durable est présentée à la section 3.3. Ceux-ci ont été élaborés par des organisations internationales et nationales d'ingénieurs ainsi que par des chercheurs. Tout comme les principes généraux décrits à la section 3.2, ceux propres à l'ingénierie ont été étudiés par l'analyse de contenu thématique. Les 152 principes recensés ainsi que leur catégorisation et leur synthèse sont présentés à l'annexe B. Avant de décrire plus en détail les outils et les adaptations au processus de conception devant permettre aux ingénieurs de prendre en compte les principes du développement durable, il est tout d'abord question de l'encadrement offert à ce sujet par les organisations canadiennes d'ingénieurs. Les initiatives des organisations situées ailleurs dans le monde sont pour leur part survolées à la section 3.3.

On dénombre au Canada 12 organisations provinciales ou territoriales d'ingénieurs, incluant l'Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ). Une organisation pancanadienne, Ingénieurs Canada, regroupe pour sa part toutes les organisations provinciales et territoriales. Tout comme celui des autres organisations canadiennes, le *Code de déontologie des ingénieurs* en vigueur au Québec ne fait pas explicitement référence au développement durable. L'article 2.01 stipule néanmoins que «Dans tous les aspects de son travail, l'ingénieur doit respecter ses obligations envers l'homme et tenir compte des conséquences de l'exécution de ses travaux sur l'environnement et sur la vie, la santé et la propriété de toute personne.» Soulignons que cette obligation prévaut sur les autres obligations de l'ingénieur envers son client ou son employeur. Cet article est toutefois trop général pour guider la mise en œuvre des principes de développement durable dans la pratique de l'ingénierie ou pour guider l'atteinte d'un compromis lorsque surgissent des enjeux contradictoires aussi importants les uns que les autres.

L'OIQ, ainsi que trois autres organisations provinciales ou territoriales, proposent un guide de pratique professionnel général à leurs membres. Seul l'OIQ aborde directement le développement durable dans la plus récente version de son guide. Les trois piliers y sont présentés, accompagnés de notions de base sur la pensée du cycle de vie et la gestion environnementale [OIQ, 2011]. Parmi les autres organisations provinciales et territoriales, quelques-unes ont néanmoins des lignes directrices sur l'environnement ou le développement durable, soit l'Alberta [APEGGA, 2004], la Colombie-Britannique [APEGBC, 1995], la Saskatchewan [APEGGS, 2000] et Terre-Neuve-et-Labrador [PEGNL, s.d.]. Sans offrir de lignes directrices, l'*Association of Professional Engineers and Geoscientists of the Province of Manitoba* a néanmoins élaboré une courte déclaration sur le développement durable [APEGM, 1999].

Les notes préparatoires à l'examen professionnel de l'OIQ [2009], consacrent une sous-section au «Défi du développement durable pour la société et l'ingénierie». Le concept et ses fondations éthiques y sont survolés. De nouvelles approches telles l'analyse du cycle de vie et la conception durable sont également mentionnées. Les autres organisations canadiennes se réfèrent pour leur part à l'ouvrage *Canadian Professional Engineering and Geoscience: Practice and Ethics* de Andrews [2009] pour l'examen professionnel. Cet ouvrage consacre un chapitre à la durabilité environnementale, où est dressé un bref portrait du développement durable avant de traiter avec plus d'attention les sujets des changements climatiques et du pic pétrolier. Ingénieurs Canada [2006] a élaboré un *Guide national sur l'environnement et le développement durable*. Ce guide se

base en grande partie sur les guides précédemment cités de l'APEGGA et de l'APEGBC. La majeure partie du guide d'Ingénieurs Canada est dédiée à la présentation et la description de neuf lignes directrices devant guider la pratique professionnelle.

2.3 Outils du développement durable pour l'ingénierie

Les outils du développement durable décrits dans ce chapitre sont regroupés en trois principales catégories : les outils de pensée hétérodoxe, les outils d'analyse et les outils de synthèse. Une section est également réservée à la participation des parties prenantes, car cette approche peut être exploitée pour renforcer chacun des outils abordés. Les outils de pensée hétérodoxe servent principalement à générer un nombre satisfaisant de concepts alternatifs pouvant répondre à un problème donné. Les outils d'analyse permettent quant à eux l'évaluation des concepts selon les critères choisis et peuvent également être utilisés pour acquérir une meilleure compréhension du contexte dans lequel se situe un projet. Finalement, les outils de synthèse (ou d'aide à la décision) permettent de prendre en compte l'information contenue dans un nombre élevé de critères, dans le but de recommander une solution préférable ou d'identifier quelques pistes d'améliorations pour chacune des options considérées.

2.3.1 Outils de pensée hétérodoxe

Devant l'ampleur des défis que pose l'atteinte d'un développement plus durable, les outils de pensée hétérodoxe assistent les ingénieurs dans la recherche de solutions différentes de celles habituellement proposées. Les techniques de créativité conventionnelles, lorsque bien utilisées, permettent la génération d'un nombre élevé de solutions affichant une grande variété. Les approches conventionnelles ont néanmoins avantage à être complétées par des stratégies inspirées du développement durable, car ces dernières favorisent de manière implicite le respect de certains principes de l'ingénierie durable.

Outils de pensée hétérodoxe associés au développement durable

Les outils inspirés du développement durable décrits au tableau 2.1 sont apparus plus récemment que les outils conventionnels. Ceux-ci intègrent certains principes de l'ingénierie durable, ce qui augmente les chances de générer des solutions respectant ces principes. La plupart des approches décrites sont apparues au cours de la dernière décennie et on dénombre de plus en plus d'études de cas faisant état de leur mise en œuvre. Leur utilisation ne semble toutefois pas encore répandue en ingénierie.

Tableau 2.1 Outils de pensée hétérodoxe associés au développement durable

Outils	Description
Biomimétisme [Benyus, 2002] et ingénierie écologique [Van Bohemen, 2005]	Le biomimétisme et l'ingénierie écologique sont deux approches similaires recherchant dans les milieux naturels des solutions aux problèmes techniques. L'ingénierie écologique cherche à créer des écosystèmes ou à s'en inspirer pour fournir des services ou fabriquer des produits. Le biomimétisme mise plutôt sur le bagage « technologique » accumulé par diverses espèces au fil de l'évolution pour orienter l'innovation.
Écologie industrielle [Harper, 2004]	L'écologie industrielle vise à identifier les transformations pouvant rendre le fonctionnement du système industriel compatible avec celui des écosystèmes en s'inspirant de ces derniers. Trois principaux domaines de recherche s'y rattachent: (1) l'utilisation cyclique et plus efficace des ressources; (2) le développement d'approches comme l'écoconception, la responsabilité élargie des producteurs et l'analyse du cycle de vie; et (3) la mise en place de systèmes industriels caractérisés par une forte interaction.
Extrapolation rétrospective [Holmberg et Robèrt [2000]	L'extrapolation rétrospective (<i>backcasting</i>) permet d'élaborer une vision idéale du futur en se basant sur les principes du développement durable. Une stratégie pour parvenir à cette situation est ensuite déduite en revenant à rebours vers la situation présente. Finalement, des options cadrant dans cette stratégie globale sont déduites puis détaillées.
Prospective stratégique [Godet, 2007]	La prospective stratégique vise à anticiper les changements probables et souhaitables dans le domaine où se situe le problème à l'étude. Les solutions recherchées sont adaptées aux changements prévus tout en s'insérant dans une stratégie permettant de progresser vers les changements souhaités.
Ingénierie selon le facteur X [Sheikh et Lovins, 2007]	L'ingénierie selon le facteur X oriente le développement technologique vers des options permettant de réduire d'un facteur donné (typiquement de 4 à 10) la consommation des ressources et les impacts sur le cycle de vie par rapport aux technologies existantes.
Stratégies d'écoconception [Thibault et Leclerc, 2007]	Des listes de stratégies d'écoconception ont été élaborées au fil des années. Leur mise en œuvre (favoriser la réutilisation et la récupération des matériaux, faciliter le désassemblage, etc.) permet habituellement de réduire l'impact environnemental d'un produit ou d'un service sur son cycle de vie.

Techniques de créativité conventionnelles

Les techniques de créativité présentées ici comme « conventionnelles » sont utilisées depuis plusieurs décennies dans les processus de résolution de problèmes, incluant la conception en ingénierie. Quelques-uns de ces outils sont : le remue-méninges, le jet d'idées sur papier, les connexions forcées, l'analyse morphologique, la synectique et les listes de vérification [Dhillon, 2006; Miller *et al.* 2001]. Sans énumérer toutes les méthodes permettant de stimuler la créativité, cette liste offre un aperçu de la variété pouvant exister. Ces outils favorisent la génération d'idées originales en contournant divers blocages intellectuels et en créant un climat propice à l'innovation. Un blocage fréquent consiste en l'adoption de la première solution satisfaisante, alors qu'une recherche plus poussée permet souvent d'arriver à des options plus performantes

[Fogler et LeBlanc, 1995]. Bien que les techniques de créativité soient surtout utilisées lors de la génération de solutions, une approche créative doit être initiée dès la phase de définition du problème. En effet, si le problème est défini de manière trop restreinte, des avenues prometteuses peuvent être exclues.

2.3.2 Outils d'analyse

Les outils d'analyse en développement durable présentés ici sont complémentaires aux outils d'analyse conventionnels nécessaires à la pratique de l'ingénierie, tels l'analyse des risques, l'analyse de la rentabilité ainsi que l'ensemble des analyses en sciences appliquées propres à chaque domaine du génie. Toutefois, la prise en compte du développement durable requiert aussi la prise en compte des dimensions environnementale, sociale et économique. Chacune de ces dimensions se décline en plusieurs facettes, ce qui explique la grande variété d'outils d'analyse couverte dans cette section.

Analyse de la dimension environnementale

De façon générale, les outils associés à la dimension environnementale visent à caractériser les divers impacts que peuvent avoir les activités humaines sur les milieux naturels et les milieux de vie. Les trois outils d'analyse environnementale décrits sont l'étude d'impact sur l'environnement, l'évaluation environnementale stratégique et l'analyse environnementale du cycle de vie.

Étude d'impact sur l'environnement

Depuis le début des années 1980, la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement doit obligatoirement être suivie lors de la réalisation de certains projets au Québec (*Loi sur la qualité de l'environnement*, article 31.1). Les projets visés sont décrits dans le *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement*. Ceux-ci sont habituellement de grande envergure (la construction de barrages, la construction d'infrastructures routières, l'implantation d'installations destinées à la gestion des matières résiduelles, etc.) et sont susceptibles d'avoir un fort impact sur l'environnement local. Vu la nature des projets visés, les études d'impact sur l'environnement (ÉIE) sont surtout réalisées pour des mandats relevant du génie civil et du génie chimique.

Les cinq principales étapes d'une ÉIE sont [MDDEP, 2003] : (1) la délimitation et la description de la communauté ou du milieu étudié; (2) la détermination et la description des variantes; (3) la

détermination et l'évaluation des impacts (positifs et négatifs); (4) le choix de mesures d'atténuation et de compensation des impacts négatifs; et (5) le suivi du projet pendant et après sa réalisation. Les impacts biophysiques considérés incluent habituellement les effets sur la qualité des eaux, de l'atmosphère et des sols, la vocation du territoire, les habitats et les espèces y vivant ainsi que les milieux acoustiques et visuels. Les impacts sur le milieu humain peuvent être inclus dans l'étude d'impact sur l'environnement, mais se limitent généralement aux impacts indirects découlant d'impacts directs sur la qualité de l'environnement (la qualité de vie, la santé publique, l'utilisation du territoire ainsi que l'influence sur les activités économiques).

Évaluation environnementale stratégique

L'évaluation environnementale stratégique (ÉES) « vise à intégrer les facteurs environnementaux à l'élaboration des politiques, [plans et programmes] publics » [Gouvernement du Canada, 2004]. L'ÉES affiche certaines similitudes avec l'ÉIE décrite précédemment. Toutefois, les effets découlant de la mise en place de politiques, plans ou programmes gouvernementaux ne peuvent être évalués de manière aussi précise que ceux associés à un projet spécifique. L'ÉES et l'ÉIE sont complémentaires dans la mesure où les politiques, plans et programmes analysés par le biais de l'ÉES portent sur des projets susceptibles de nécessiter une ÉIE. L'utilisation de l'ÉES pallie également certains manques de l'ÉIE, car il est possible d'encadrer le type et le nombre de projets qui sont réalisés en intervenant à un niveau supérieur. L'ÉES peut également prendre en compte les impacts cumulatifs d'un ensemble de projets, ce que la réalisation d'ÉIE sur une base individuelle ne permet habituellement pas [João, 2005].

Selon la directive du Gouvernement du Canada [2004], l'ÉES comporte deux principales phases. En premier lieu, l'exploration préliminaire permet de déterminer si les considérations environnementales potentielles sont importantes. Si tel est le cas, l'analyse détaillée des effets environnementaux identifiés est ensuite réalisée. L'ÉES doit alors traiter des sujets suivants : (1) l'évaluation de la portée et de la nature des effets environnementaux potentiels; (2) la mise en œuvre des mesures d'atténuation des effets négatifs ou d'amélioration des effets positifs; (3) l'évaluation des effets environnementaux résiduels; (4) la nécessité ou non de faire le suivi; et (5) l'intégration des préoccupations des parties prenantes. Au gouvernement canadien, L'ÉES est surtout utilisée dans le domaine des transports, de l'énergie et de l'agriculture.

Analyse environnementale du cycle de vie

L'analyse environnementale du cycle de vie (AECV) sert à évaluer l'impact d'un produit, d'un service ou d'une infrastructure sur les ressources et les écosystèmes tout au long de son cycle de vie. Celui-ci inclut typiquement l'extraction des ressources brutes, leur transformation en matières premières ou en composantes, l'assemblage ou la construction, l'utilisation et l'entretien ainsi que la fin de vie. L'AECV est composée de quatre étapes [ISO, 2006a] : (1) la définition de l'objectif et du champ d'étude; (2) l'analyse de l'inventaire; (3) l'évaluation des impacts sur l'environnement; et (4) l'interprétation des résultats. Les impacts typiquement considérés sont regroupés en trois catégories : les dommages à la santé humaine, les dommages aux écosystèmes et la consommation des ressources [Jolliet *et al.*, 2010]. Les normes ISO 14040 et 14044 définissent de manière précise la méthodologie devant être suivie pour chacune de ces étapes, de manière à favoriser la réalisation d'analyses de qualité et transparentes.

Le domaine d'application de l'AECV est vaste et peut autant porter sur des secteurs économiques entiers que sur des procédés industriels, en passant par les services, les produits de consommation et les infrastructures. De nombreuses initiatives d'envergure font référence à l'AECV, par exemple la politique intégrée de produits de la Commission européenne, le processus de Marrakech sur la consommation et la production durable ainsi que la stratégie gouvernementale québécoise de développement durable.

Analyse de la dimension économique

La dimension économique est traitée dans tous les projets d'ingénierie par l'estimation des coûts directs. Les outils présentés dans cette section, soit l'analyse des impacts économiques, l'analyse de l'équité, l'analyse des coûts sur le cycle de vie et l'évaluation monétaire de l'environnement, ont toutefois une portée plus large.

Analyse des impacts économiques

L'analyse des impacts économiques (ou étude d'impact économique) permet d'estimer les répercussions économiques, positives ou négatives, d'un projet ou d'un programme sur un territoire donné, que ce soit une municipalité, une région, une province ou un pays. L'impact économique peut être mesuré selon plusieurs variables, par exemple le nombre d'emplois créés, la contribution au produit intérieur brut, les salaires versés, la richesse créée ou les ventes réalisées [Gouvernement de l'Ontario, 2008]. Trois types d'impacts économiques sont

considérés : les impacts directs (les emplois et les salaires générés directement par le projet à l'étude), les impacts indirects (les emplois et les salaires générés dans les secteurs secondaires fournissant des produits et services nécessaires au projet) et les impacts induits (les effets sur l'économie locale liés aux dépenses des ménages qui ont un salaire en travaillant au projet).

Les projets soumis à l'analyse des impacts économiques sont habituellement réalisés ou supportés par les gouvernements (nationaux, provinciaux ou locaux). Cette analyse est justifiée dans la mesure où d'importants investissements publics sont requis. Les étapes à réaliser sont similaires à celles énumérées pour l'évaluation des impacts environnementaux et l'analyse des impacts sociaux : (1) la délimitation du champ d'étude et choix des variantes; (2) la définition du niveau de détail nécessaire pour l'étude; (3) l'identification des impacts économiques à considérer et des données requises; (4) l'évaluation des impacts directs, indirects et induits. Des modèles macroéconomiques sont souvent nécessaires pour dériver les impacts directs et induits à partir des dépenses directes estimées.

Analyse de l'équité

À prime abord, il est nécessaire de statuer sur ce qui est considéré équitable et ce qui ne l'est pas avant d'évaluer si une mesure est équitable. Cette première étape est « normative », car ses conclusions sont influencées par les valeurs des individus y participant. Différentes interprétations du concept d'équité peuvent être considérées, notamment l'accès garanti (un service est offert selon les besoins des individus et leur contribution est indépendante de l'utilisation du service), le principe du bénéfice (la contribution des individus doit être proportionnelle au bénéfice qu'ils retirent d'un service) et l'approche de la capacité à payer (la contribution doit correspondre à un sacrifice équivalent pour tous, par exemple une fraction donnée du revenu disponible) [Brown et Jackson, 1990]. Suit ensuite une deuxième étape « descriptive », visant à mesurer l'écart entre la situation observée et une situation de référence, cette dernière traduisant ce qui a été défini comme étant équitable lors de la première étape.

Deux principales avenues existent pour estimer le niveau d'équité d'une intervention : la mesure des inégalités et l'évaluation du caractère progressif ou régressif. L'indice de Gini est l'un des coefficients le plus couramment utilisé pour l'évaluation des inégalités [Duclos et Araar, 2006]. Historiquement, cet indice a surtout servi à mesurer le niveau d'inégalité dans la distribution des revenus dans une population donnée, mais il peut être adapté pour servir à d'autres fins. De

nombreuses approches utilisées pour évaluer la progressivité ou la régressivité d'interventions sont présentées dans Duclos et Araar [2006] et reposent sur les définitions suivantes :

- Une mesure progressive est redistributive, car elle permet de diminuer les écarts dans la distribution des revenus disponibles. Le financement de services selon des tarifs croissants lorsque la consommation dépasse certains seuils est également considéré progressif.
- Une intervention régressive a pour sa part comme effet d'amplifier les écarts dans la distribution des revenus disponibles ou impose une contribution décroissante au fur et à mesure que le niveau de consommation d'un service augmente.

Une étude distributive peut toucher tout type de coût, bénéfice ou impact. L'analyse de l'équité est principalement utilisée pour évaluer les politiques publiques, particulièrement la politique fiscale, ainsi que le financement des services publics. En dernier lieu, l'équité ne s'exprime pas uniquement en termes économiques, mais peut également porter sur l'accès équivalent à un service, l'inclusion dans un processus participatif ou la garantie de conditions de travail décentes, peu importe le sexe, l'origine ethnique, les limitations physiques ou la classe sociale.

Analyse des coûts sur le cycle de vie

L'analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV) a certains points en commun avec les techniques utilisées habituellement pour l'analyse économique en ingénierie. Il est important de souligner que certaines variantes de l'ACCV ont été développées avant l'AECV. Ces approches se rattachent à ce qu'on peut appeler l'ACCV conventionnelle [Hunkeler et coll., 2008]. Lorsque l'ACCV est utilisée conjointement avec l'AECV, il est préférable d'adopter la même structure pour les deux études, c'est-à-dire celle présentée dans la norme ISO 14040. Par conséquent, cette approche est nommée ACCV environnementale. Une telle démarche garantit que les mêmes phases du cycle de vie sont considérées autant pour les impacts environnementaux que pour les coûts et que les résultats sont facilement comparables. La combinaison de l'AECV et de l'ACCV s'avère pertinente pour trois principales raisons : (1) l'AECV considérée seule a une utilité limitée lors de la prise de décision; (2) il est important d'identifier les relations entre les coûts encourus et les impacts environnementaux évités, et (3) il est possible que soient ignorées les conséquences économiques des options comparées dans une AECV [Norris, 2001].

Comparativement à ce que l'on peut voir dans les approches conventionnelles, certaines catégories de coûts sont considérées dans l'ACCV même si elles ne sont pas assumées par le

producteur ou le consommateur, soit la gestion en fin de vie, les externalités susceptibles d'être internalisées, les amendes et le passif environnemental. L'ACCV conventionnelle est surtout utilisée dans les secteurs où les objets d'étude ont une longue durée de vie (bâtiments, infrastructures, équipement militaire, etc.) tandis que les applications récentes de l'ACCV environnementale touchent des domaines aussi variés que l'AECV [Hunkeler et coll., 2008].

Évaluation monétaire des biens et services environnementaux

Les biens et services fournis par l'environnement (ressources, assimilation des polluants, régulation du climat, etc.) ne sont habituellement pas transigés sur les marchés. Ceux-ci ont tout de même une valeur pour les individus qui en bénéficient. Plusieurs techniques ont été développées pour assigner une valeur monétaire aux biens et services environnementaux dont la valeur n'est pas définie sur le marché. Les plus communes incluent : l'évaluation des pertes ou des coûts additionnels engendrés par la pollution, l'évaluation des dépenses engagées pour prévenir ou mitiger les impacts sur l'environnement, l'estimation des variations dans la valeur des propriétés ou l'évaluation de la valeur de contingence [Field et Olewiler, 2002]. Les applications typiques pour chacune de ces techniques sont décrites au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Techniques en évaluation monétaire des biens et services environnementaux

Technique	Applications
Pertes dues aux baisses de productivité des individus ou des écosystèmes	Effets de la pollution sur la santé. Impact de la pollution sur l'agriculture.
Coûts additionnels en soins de santé	Effets de la pollution sur la santé.
Coûts de remplacement ou de restauration d'une propriété endommagée	Dommages aux infrastructures dus à la pollution. Dommages aux écosystèmes.
Dépenses engagées pour la prévention ou la mitigation d'impacts sur l'environnement	Pollution sonore, atmosphérique ou aquatique. Effets négatifs sur les citoyens, industries ou écosystèmes.
Variations de la valeur des propriétés ou des salaires	Pollution sonore, atmosphérique ou aquatique et effets sur la santé. Implantation de sites d'enfouissement.
Coûts de déplacement	Activités récréatives dans la nature.
Évaluation de la valeur de contingence	Changement dans la qualité de l'environnement.

Ces techniques peuvent être utilisées pour évaluer les externalités environnementales (les coûts imposés à la société par une exploitation privée des biens et services environnementaux) ou les bénéfices environnementaux (les gains associés à la conservation d'espaces naturels ou à l'amélioration de la qualité de l'environnement). Elles peuvent aussi être employées pour mesurer les coûts ou les avantages de nature purement sociale. Une fois exprimés en valeur monétaire, il est possible d'intégrer les bénéfices ou les coûts environnementaux dans l'ACCV ou

dans l'analyse coûts-avantages. L'évaluation monétaire de l'environnement est typiquement utilisée dans le secteur public pour des projets de grande envergure (transports, assainissement des eaux usées, contrôle de la pollution atmosphérique, etc.)

Analyse de la dimension sociale

L'analyse de la dimension sociale fait appel à des approches peu connues en ingénierie et ce de façon plus évidente que pour les dimensions environnementale et économique. Leur revue met en évidence les techniques et les enjeux propres à cette dimension. Les outils présentés sont l'analyse des parties prenantes, l'analyse des impacts sociaux et l'analyse sociale du cycle de vie. Ces outils mobilisent des méthodologies propres aux sciences sociales, telles que l'observation directe, l'entrevue semi-dirigée, le groupe de discussion, le sondage, etc.

Analyse des parties prenantes

Les parties prenantes sont des individus, groupes ou institutions ayant des droits et des intérêts face à un enjeu ou un projet. Leur interaction s'articule autour des pouvoirs, connaissances et compétences possédés par chacune d'entre elles [OCDE, 2002]. L'analyse des parties prenantes permet, entre autres, de cibler leurs intérêts par rapport à un problème donné, d'identifier les conflits existant entre les parties prenantes et d'identifier les relations (positives ou négatives) susceptibles d'influencer le dénouement du problème étudié. L'analyse des parties prenantes est habituellement réalisée avant d'entamer un processus de participation publique, car une bonne connaissance de celles-ci est essentielle pour déterminer quelles méthodes de participation sont préférables. La participation des parties prenantes est traitée plus en détail à la section 2.3.4.

L'analyse des parties prenantes comprend quatre principales étapes: (1) l'identification des parties prenantes et de leurs intérêts par rapport au problème étudié; (2) l'étude des relations entre les parties prenantes et de leur pouvoir d'influence; (3) l'évaluation des risques et incertitudes par rapport aux comportements des parties prenantes; et (4) l'identification de méthodes pour l'inclusion des parties prenantes dans le processus décisionnel [OCDE, 2002]. De manière à pouvoir dresser un portrait complet des parties prenantes ciblées (intérêts, relations, pouvoirs, lien avec les enjeux du développement durable, etc.) plusieurs approches complémentaires sont proposées dans OCDE [2002]. Leur identification nécessite la consultation d'individus œuvrant dans la communauté depuis longtemps, la revue de documents officiels ou de la presse écrite, la publication d'annonces dans les médias locaux ainsi que la demande

d'information auprès de parties prenantes rencontrée en première vague. Diverses méthodes sont également disponibles pour leur analyse à proprement dit, soit les séances de remue-méninges, les entrevues semi-structurées, la consultation d'archives et les diagrammes. L'analyse des parties prenantes est encadrée par divers guides sur la participation du public. Ces guides peuvent être de nature générale [CSA, 2002] ou porter sur un contexte particulier comme l'évaluation environnementale [ACEE, 2008], les installations agroalimentaires [MAMR, 2005] ou les interventions dans les pays en voie de développement [Banque mondiale, 2003a].

Évaluation des impacts sociaux

L'évaluation des impacts sociaux (ÉIS) inclut les processus d'analyse, de suivi et de gestion des conséquences sociales découlant d'interventions planifiées (politiques, plans, programmes ou projets), que ces conséquences soient positives, négatives, voulues ou accidentelles [International Association for Impact Assessment, 2003]. Le champ des impacts sociaux est très vaste et fait référence au mode de vie, à la culture, à la dynamique communautaire, aux institutions politiques, à l'accès aux ressources naturelles, à l'exposition aux risques environnementaux, à la santé et au bien-être, ainsi qu'aux droits humains [Commission européenne, 2010; International Association for Impact Assessment, 2003].

La description du contexte social, puis l'identification des impacts sociaux potentiels associés à un projet ne sont pas les seuls objectifs de l'ÉIS. La méthode vise plutôt à maximiser la contribution d'un projet au développement social, notamment en ce qui concerne l'inclusion (accès aux services publics, aux marchés ou à l'information), la responsabilisation (renforcement des capacités, implication des parties prenantes ou accroissement de l'imputabilité) et la sécurité (respect des droits, gestion des conflits ou accès au système judiciaire) [Banque mondiale, 2003a]. L'ÉIS permet aussi d'identifier comment le contexte social peut nuire au succès d'un projet et de concevoir des mesures pour mitiger d'éventuels impacts négatifs. L'analyse des impacts sociaux demande tout d'abord une bonne caractérisation de la diversité sociale, des institutions et des parties prenantes, puis mobilise une vaste gamme d'outils propres aux sciences sociales pour la cueillette et le traitement des données [Banque mondiale, 2003b].

Analyse sociale du cycle de vie

L'analyse sociale du cycle de vie (ASCV) est le troisième pilier, après l'analyse environnementale du cycle de vie et l'analyse des coûts sur le cycle de vie, à être intégré à la gestion durable du

cycle de vie. L'importance accrue accordée aux notions de triple bilan (*triple bottom line*) et de RSE a motivé cette intégration. L'ASCV se base sur le même cadre que celui décrit dans les normes ISO 14040 et ISO 14044 pour l'AECV et est donc réalisée en suivant les mêmes étapes [Benoît et Mazjin, 2009]. Les impacts sociaux sont classifiés selon les parties prenantes (travailleurs, communauté locale, société, consommateurs et partenaires dans la chaîne d'approvisionnement) ou selon les catégories d'impact (droits de l'homme, conditions de travail, santé et sécurité, héritage culturel, gouvernance, et répercussions socio-économiques).

Les indicateurs utilisés pour caractériser les impacts sociaux sont quantitatifs ou qualitatifs. Leur évaluation se base sur des données génériques ou des données recueillies spécifiquement pour le projet à l'étude à l'aide de méthodes issues des sciences sociales. L'ASCV est une méthode en développement, le premier document basé sur un consensus international ayant été publié récemment [Benoît et Mazjin, 2009]. Ce guide contient essentiellement des lignes directrices et offre un support limité pour l'utilisation de l'ASCV. En ce moment, les applications se limitent principalement à des études de cas menées dans le cadre de projets de recherche.

Analyse multidimensionnelle

Les outils couverts jusqu'à présent se concentrent sur une dimension particulière du développement durable et doivent être utilisés conjointement. Les outils multidimensionnels ont l'avantage de traiter un plus grand nombre d'enjeux associés au développement durable en une seule démarche et ainsi d'exposer plus clairement les liens existant entre eux. Ces outils se basent toutefois sur des approches déjà incluses dans les outils unidimensionnels. Cette section porte plus précisément sur l'analyse intégrée des impacts et l'analyse coûts-avantages.

Analyse intégrée des impacts

La Commission européenne [2009] a déposé une série de lignes directrices pour l'analyse intégrée des impacts découlant de ses politiques. Les impacts environnementaux, économiques et sociaux sont ainsi évalués en parallèle, puis considérés de manière simultanée lors de la prise de décision. Ces impacts sont toutefois évalués à l'aide de procédures élaborées au préalable pour l'analyse environnementale, économique ou sociale. Les liens existants entre les dimensions du développement durable ont été soulevés à la section 2.1 alors que la description des approches utilisées pour évaluer les impacts selon chacune de ces dimensions a laissé entrevoir les recouvrements et les dédoublements potentiels. L'analyse intégrée des impacts a pour objectif

de mieux traiter les interfaces existant entre les dimensions du développement durable et d'éviter le dédoublement de cueillette de données et d'analyses.

La méthodologie développée par la Banque mondiale pour l'analyse des impacts sur la pauvreté et le social peut aussi être considérée comme une analyse intégrée, car elle traite à la fois des impacts économiques, des aspects distributionnels et des impacts sociaux associés à une politique [Banque mondiale, 2003b].

Analyse coûts-avantages

L'analyse coûts-avantages (ou coûts-bénéfices) est surtout utilisée dans le domaine public pour évaluer l'efficacité des politiques, programmes ou réglementations proposées. Les répercussions significatives d'un projet sur l'ensemble des acteurs de la société et sur l'environnement sont d'abord identifiées. Les avantages et les coûts associés à la mise en place du projet ainsi qu'à ses répercussions sont ensuite quantifiés en terme monétaire. Cette approche facilite la comparaison et l'agrégation d'une vaste gamme d'impacts environnementaux, sociaux et économiques.

En contrepartie, la tâche d'attribuer une valeur monétaire à tous les impacts identifiés peut s'avérer difficile, voire impossible. Il est d'ailleurs suggéré de considérer les éléments significatifs pour lesquels une valeur monétaire ne peut être déterminée lors de la prise de décision, en se basant sur des quantités physiques ou à tout le moins de manière qualitative [Gouvernement du Canada, 2007]. Lorsqu'appliquée en ingénierie, l'analyse coûts-avantages porte typiquement sur des projets menés ou appuyés par le gouvernement, par exemple la mise en place de mesures pour accroître la sécurité des moyens de transport ou l'utilisation de technologies pour le contrôle de la pollution.

Outils de questionnement et d'analyse du développement durable

Les outils de questionnement et d'analyse en matière de développement durable (OQADD), aussi appelées « grilles de développement durable », se situent à l'interface des outils d'analyse et des outils de synthèse. En effet, ils contiennent habituellement une liste de questions ou de critères (volet analyse) ainsi qu'une procédure pour l'agrégation des résultats (volet synthèse). Ceux-ci servent au moment de l'élaboration des projets pour favoriser l'intégration des enjeux les plus pertinents ou lors de leur évaluation pour valider si ces enjeux ont été bien traités.

Selon Boutaud [2004], les OQADD se subdivisent en quatre étapes caractérisant tout processus d'aide multicritère à la décision : (1) définir l'action prévue ou les actions potentielles (un seul projet ou plusieurs variantes); (2) énumérer les critères (classés en dimensions ou en thématiques); (3) évaluer chaque action suivant les critères (selon diverses approches et échelles); et (4) agréger les résultats (pour faciliter l'interprétation des résultats). Dans son analyse des OQADD utilisés dans les collectivités françaises, Boutaud [2004] propose une typologie selon quatre axes pour différencier les variantes rencontrées en pratique :

- La complexité ou la simplicité dépend de l'exhaustivité des thèmes traités et de la rigueur dans l'évaluation des critères.
- L'évaluation par un expert ou en groupe varie en fonction du degré de participation des parties prenantes.
- Un OQADD universel permet plusieurs applications différentes tandis qu'un OQADD particulier porte spécifiquement sur un secteur ou un type de projet.
- L'utilisation *a priori* d'un OQADD sert à l'évaluation de variantes potentielles tandis qu'une application *a posteriori* vise de projets déjà réalisés.

De nombreuses grilles pouvant s'appliquer à une gamme plus ou moins large de projets ont été proposés au cours des dernières années, notamment par la Fédération internationale des ingénieurs-conseils (FIDIC) [2004] et Villeneuve [2007].

La liste d'indicateurs de la FIDIC est inspirée de celle proposés par la Commission des Nations Unies sur le développement durable. Les 45 indicateurs sont classés selon les trois dimensions du développement durable et se répartissent en 18 thèmes. La pertinence de chaque indicateur doit être évaluée en fonction du projet à l'étude. Les indicateurs qui ne s'appliquent pas au projet peuvent ainsi être écartés, ceux retenus peuvent être adaptés pour en faciliter l'évaluation et des indicateurs supplémentaires peuvent être ajoutés au cadre général. L'évaluation des critères se fait selon une échelle allant de faible à élevé, tel que décrit à la figure 2.2. Les différents niveaux doivent être établis pour chaque critère avant de procéder à l'évaluation. Aucune procédure n'est proposée pour l'agrégation des résultats.

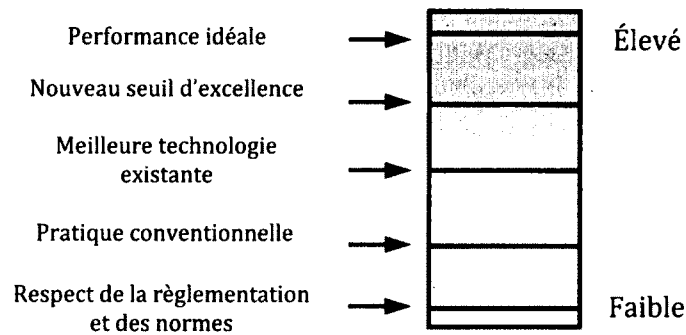


Figure 2.2 Échelle d'évaluation de la grille d'analyse de la FIDIC [2005]

La grille d'analyse du développement durable de Villeneuve [2007] compte pour sa part 63 objectifs organisés selon quatre pôles (équité, écologique, social et économique) et 19 lignes directrices. Les objectifs sont évalués selon une échelle ordinaire allant de 0% à 100%. Villeneuve [2007] suggère de faire remplir la grille d'analyse par plusieurs intervenants de manière à susciter les discussions et à faciliter l'identification de pistes d'amélioration. L'analyse sommaire ne requiert pas la pondération des objectifs, contrairement à l'analyse exhaustive, qui inclut trois niveaux de pondération. Un objectif souhaitable se voit ainsi attribué une pondération de 1, un objectif nécessaire une pondération de 2 et objectif essentiel une pondération de 3. L'agrégation des résultats se fait à l'aide de la somme pondérée, méthode traitée à la section 2.3.3.

Échelles d'évaluation

Le survol des OQADD met en évidence la multiplicité des échelles disponibles pour l'évaluation. Les principaux types de variables ou d'échelles sont l'échelle qualitative nominale, l'échelle qualitative ordinaire et l'échelle cardinale [Maystre et Bollinger, 1998; Durand et Blais, 2004].

Échelle qualitative nominale

Pour l'échelle nominale, les éléments sont classés dans un certain nombre de catégories sans qu'il y ait d'ordonnement entre celles-ci. L'échelle peut être binaire (oui/non) ou posséder plus de catégories (par exemple, traitement biologique, physico-chimique ou membranaire).

Échelle ordinaire

Selon l'échelle ordinaire, les éléments sont classés en ordre et les catégories peuvent avoir ou non une correspondance numérique. Dans le second cas, l'échelle est parfois appelée semi-quantitative. Voici quelques exemples d'échelles ordinaires courantes :

- Échelle de Pugh (relatif à un objet de référence) :

Fortement inférieur	Légèrement inférieur	Équivalent	Légèrement supérieur	Fortement supérieur
--	-	=	+	++

- Échelle de Likert (attitude par rapport à un énoncé) :

Fortement en accord	En accord	Ni accord ou désaccord	En désaccord	Fortement en désaccord
1	2	3	4	5

- Échelle sémantique d'Osgood (classement selon des qualités contraires) :

Utile			-	Inutile		
Extrêmement	Très	Assez	Sans avis	Assez	Très	Extrêmement

Échelle cardinale

Cette échelle, aussi appelée quantitative ou numérique, permet la mesure par rapport à une unité standardisée. L'échelle cardinale à intervalle possède un zéro arbitraire et ne permet que la mesure des différences, non des rapports. Par exemple, dans le cas de la température exprimée en degrés Celsius, 0°C ne signifie pas absence de température ou d'énergie. L'échelle cardinale proportionnelle possède pour sa part un zéro absolu et permet la mesure des rapports. Par exemple, un revenu de 40 000\$ correspond à un niveau de richesse deux fois plus élevé qu'un revenu de 20 000\$. Une échelle cardinale peut être convertie en échelle ordinale si une correspondance est définie entre des catégories et des valeurs numériques. Par exemple, l'indice de développement humain (IDH) permet de comparer le niveau de développement des pays à l'aide d'une échelle de 0 à 1 auxquels se rattachent quatre niveaux (PNUD, 2011). L'IDH est calculé à partir de statistiques nationales sur la santé, l'éducation et le niveau de vie. La conversion des variables pour la santé est illustrée au tableau 2.3.

Tableau 2.3 Calcul de l'indicateur sur la santé pour l'IDH

Calcul	Niveau	Espérance de vie
Variable : espérance de vie (é.v.)	Très élevé (1 > é.v. > 0,9)	85 ans à 79 ans
Conversion linéaire :	Élevée (0,9 > é.v. > 0,8)	79 ans à 73 ans
0 = 25 ans et 1 = 85 ans	Moyen (0,8 > é.v. > 0,5)	73 ans à 55 ans
Niveau = (é.v - 25) / (85-25)	Faible (0,5 > é.v. > 0)	55 ans à 25 ans

Dans le cas de l'IDH, la conversion de trois indicateurs (santé, éducation et niveau de vie) sur une échelle unique allant de 0 à 1 permet de synthétiser l'information disponible en un seul indice, ce

dernier étant calculé à partir de la moyenne géométrique des trois indicateurs. Tel que présenté à la section suivante, cette méthode n'est qu'une parmi plusieurs développées pour agréger des données variées dans le but de supporter la prise de décision.

2.3.3 Outils de synthèse et d'aide à la décision

La multiplicité des enjeux reliés au développement durable exige l'utilisation d'un certain nombre d'outils lorsque vient le temps d'analyser un projet donné. Que ce soit pour recommander une option préférable parmi un groupe d'alternatives ou pour choisir des pistes d'amélioration pour bonifier une option donnée, il est généralement nécessaire de synthétiser la gamme de données recueillies. Diverses méthodes d'aide à la décision d'une complexité variable sont couvertes dans cette section.

Méthodes simples d'aide à la décision

Les méthodes simples décrites ici sont relativement intuitives [Azapagic et Perdan, 2005a]:

- Méthode uni-critère : l'ensemble des critères sont classés en ordre d'importance et l'option affichant la meilleure performance selon le critère jugé le plus important est retenue.
- Méthode conjonctive : des seuils minimums sont définis pour un ou plusieurs critères et seules les options respectant l'ensemble des seuils sont considérées acceptables.
- Méthode disjonctive : des seuils minimums sont définis pour plusieurs critères et seules les options respectant au moins un des seuils sont considérées acceptables.

Ces méthodes sont facilement applicables, dans la mesure où il est possible de définir des seuils pertinents ou d'exprimer les critères selon des échelles comparables.

Méthodes d'aide à la décision multicritère basées sur l'agrégation

Les méthodes basées sur l'agrégation impliquent toutes dans un premier temps la pondération des critères, puis, en second lieu, l'évaluation de la performance globale pour chacune des options par la sommation des résultats obtenus pour chaque critère. La méthode de la somme pondérée est la plus simple des méthodes basées sur l'agrégation. Elle consiste à attribuer un poids à chacun des critères, à multiplier la performance de chaque option selon chaque critère par son poids, puis finalement à faire la somme des facteurs poids-performance pour chaque option (équation 2.1). L'option retenue est celle affichant la plus haute somme pondérée.

$$P_n = \sum w_k p_{nk} \quad (2.1)$$

Où :

P_n : Performance totale de l'option n

w_k : Poids du critère k

p_{nk} : Performance de l'option n selon le critère k

Pour faciliter la mise en œuvre de la méthode, la somme des poids attribués aux critères correspond à 100% et la performance des options selon chaque critère est ramenée sur une échelle semblable. L'application de la méthode pour un cas à trois options et trois critères est illustrée au tableau 2.4. Dans cet exemple, l'option C ressort comme étant préférable aux autres.

Tableau 2.4 Agrégation des résultats par la somme pondérée

	Option A	Option B	Option C
Critère 1 (50%)	7 / 10	3 / 10	9 / 10
Critère 2 (20%)	2 / 10	10 / 10	3 / 10
Critère 3 (30%)	1 / 10	8 / 10	4 / 10
Total	4,2 / 10	5,9 / 10	6,3 / 10

La méthode SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*) développée par Edwards et Newman (1982) attribue les poids aux critères et exprimer ces critères selon une échelle comparable de manière plus élaborée que la somme pondérée. Les poids des critères sont définis de manière comparative, en attribuant un certain poids au critère le moins important (par exemple 10), puis en estimant l'importance relative des autres critères par rapport à celui-ci. Un critère jugé deux fois plus important que le critère de référence se verrait attribué un poids de 20. Une fois les critères pondérés, leur poids est normalisé de manière à ce que la somme des poids donne 100. Des fonctions d'utilité linéaires sont ensuite définies pour chaque critère de manière à pouvoir exprimer la performance des options sur une échelle de 0 à 1, indépendamment de l'unité propre à chaque critère.

La figure 2.3a illustre une fonction d'utilité linéaire pour l'évaluation d'un critère concernant le coût tandis que la figure 2.3b propose une fonction similaire, cette fois-ci pour un critère concernant le rendement d'une station d'épuration. Un coût faible maximise l'utilité tandis qu'un rendement faible minimise l'utilité. Une fois l'ensemble des utilités évaluées et pondérées, l'option affichant la plus haute somme des facteurs poids-utilité s'avère être l'option préférable.

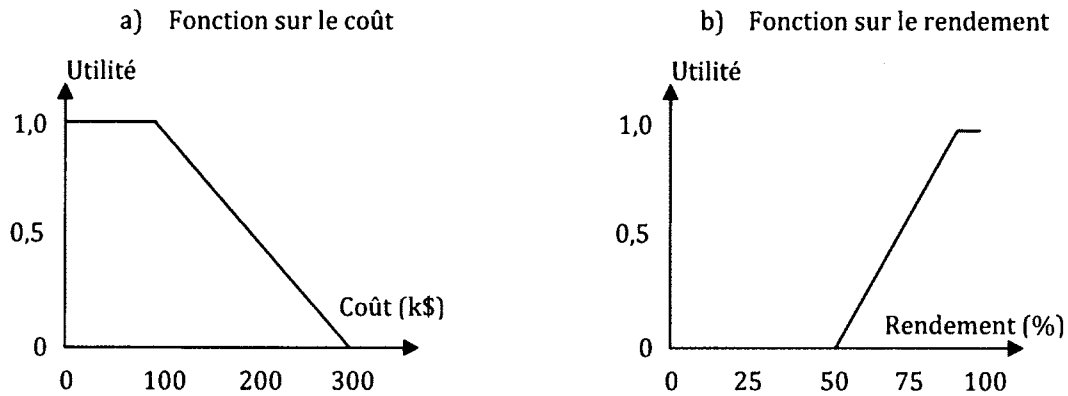


Figure 2.3 Fonctions d'utilité linéaire pour la méthode SMART

La méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process* ou processus analytique hiérarchique) se base sur une approche comparative pour définir le poids des critères et pour évaluer la performance des options [Saaty, 1980]. Les critères sont tout d'abord organisés selon une hiérarchie à plusieurs niveaux. Dans l'exemple de la figure 2.4, trois dimensions sont définies, chacune détaillée par 2 thèmes, eux-mêmes évalués à l'aide de 2 critères, pour un total de 12 critères.

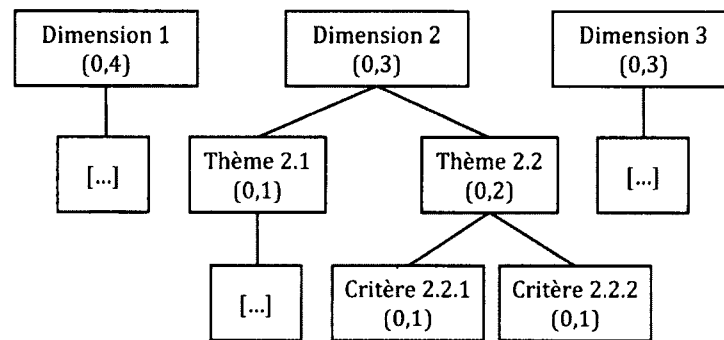


Figure 2.4 Hiérarchisation des critères selon la méthode AHP

Pour chaque niveau de la hiérarchie, les ensembles de critères ou les critères sont comparés par paire afin d'évaluer leur importance relative, ce qui permet de définir leur poids. Un ratio de 1 est attribué à une paire de critères également importants, un ratio de 3 pour un critère relativement plus important qu'un autre et un ratio de 9 pour un critère beaucoup plus important qu'un autre. La somme des poids des éléments à un niveau inférieur (ex. : celui des thèmes) correspond au poids attribué à ce regroupement d'éléments au niveau supérieur (ex. : la dimension correspondante). L'évaluation de la performance des options selon chaque critère se fait également par comparaison à l'aide de ratios. Paire par paire, les options sont ainsi comparées pour déterminer si elles sont équivalentes ou si l'une d'entre elles est préférable, que ce soit

modérément ou fortement. Finalement, la performance globale de chacune des options est déduite d'après la somme des facteurs poids-performance.

Méthodes d'aide à la décision multicritère basées sur le surclassement

Les méthodes basées sur le surclassement diffèrent des méthodes basées sur l'agrégation, en ce sens qu'elles ne visent pas l'évaluation de la performance de chaque option selon une échelle commune, mais plutôt le classement des options les unes par rapport aux autres. Ces méthodes nécessitent la comparaison par paire de chacune des options selon les critères choisis et emploient des algorithmes mathématiques reposant sur les concepts d'indifférence, de préférence et de véto. Le seuil d'indifférence correspond à la valeur sous laquelle la différence entre deux options comparées selon un critère donné est jugée trop faible pour permettre de discriminer les options. Le seuil de préférence fixe pour sa part une valeur au-delà de laquelle la différence entre deux options permet de confirmer un net avantage en faveur de l'une par rapport à l'autre. Finalement, le seuil de véto fixe une valeur critique pour la différence entre deux options au-delà de laquelle l'option avec la plus faible performance ne peut être considérée meilleure que l'autre, peu importe sa performance selon les autres critères. La solution préférable se trouve à être celle ayant le plus surclassée les autres et ayant été le moins surclassée par les autres, par rapport à l'ensemble des critères. ELECTRE et PROMETHEE sont parmi les méthodes basées sur le surclassement les plus utilisées [Figueira *et al.*, 2005].

Méthodes d'aide à la décision multicritère basées sur la comparaison à un idéal

La méthode TOPSIS (*technique for order by similarity to ideal solution*) s'apparente aux méthodes basées sur l'agrégation. Toutefois, au lieu de rechercher la performance maximale selon un ensemble de critères, ces méthodes visent plutôt à identifier une option se situant le plus près d'une solution « idéale » selon tous les critères. Selon TOPSIS, la solution idéale est composée des meilleures performances de chaque option sur chaque critère [Olson, 2004]. La solution souhaitée peut aussi être définie au préalable, en fixant des objectifs ou des cibles pour chaque critère, tel que suggéré dans la méthode du *goal programming* [Jones et Tamiz, 2010].

Les méthodes d'optimisation telles la programmation linéaire et la méthode d'enveloppement ne sont pas traitées dans la revue de littérature, car celles-ci sont adaptées à l'optimisation de situations existantes ou bien définies, mais non à la comparaison de variantes distinctes [Belton, 1986] tel que rencontré en conception.

Prise de décision multicritère et développement durable

Peu importe le contexte, la poursuite simultanée de plusieurs objectifs complique la prise de décision. Ceci est d'autant plus vrai lorsque des principes de développement durable sont utilisés pour orienter les choix, non seulement en raison du nombre potentiellement élevé d'enjeux qui leur sont associés, mais aussi à cause de leur nature propre. En premier lieu, les enjeux du développement durable reposent habituellement tous sur des valeurs légitimes. Ces valeurs entrent en conflit lorsqu'une solution ne peut toutes les respecter de manière satisfaisante. Dans le cas où la décision est entre les mains d'un seul individu, celui-ci sera amené à faire des compromis et prioriser certaines valeurs au détriment d'autres. La prise de décision est d'autant plus difficile dans la situation où plusieurs parties prenantes sont impliquées et que leurs priorités sont divergentes. En fonction de leurs intérêts, leurs responsabilités ou leurs valeurs, certaines parties prenantes accorderont ainsi plus de poids à certains enjeux plutôt que d'autres. Au-delà des préférences des parties prenantes, il découle du cadre théorique propre au développement durable que toute action posée doit viser un équilibre entre les dimensions environnementale, sociale et économique. Ceci implique que la méthode d'aide à la décision employée ne doit pas permettre qu'une performance médiocre selon une des dimensions puisse entièrement être compensée par une performance élevée selon une autre dimension [Munda, 2005].

En second lieu, l'évaluation d'alternatives selon des critères de développement durable implique de traiter des données affichant une certaine incertitude. Celle-ci est d'autant plus élevée lorsque les impacts et bénéfices résultant d'un projet se matérialisent à moyen ou long terme. La multiplicité et l'hétérogénéité des enjeux considérés amène également les décideurs à prendre en compte des critères quantitatifs ou qualitatifs variés. Un effort doit donc être fait pour exprimer ces critères sur une base similaire ou, si cela s'avère impossible, les intégrer au processus décisionnel selon des approches complémentaires.

Munda [2005] insiste sur le fait que les méthodes d'aide à la décision multicritère viennent assister le décideur dans sa tâche, mais ne s'y substituent pas. Dans le cadre de la conception en ingénierie, ces méthodes ne servent pas uniquement à identifier le meilleur choix, mais ont plutôt avantage à être mobilisées pour mettre en évidence les compromis pouvant être atteints ou alors les forces et les faiblesses de chaque alternative [Otto et Wood, 2001]. Ainsi, la prise de décision s'inscrirait dans un processus itératif plutôt que séquentiel, les différentes alternatives

pouvant être améliorées ou combinées au fur et à mesure que la conception progresse. Même s'il est souhaitable, d'après la littérature sur le développement durable, d'impliquer les parties prenantes dans le processus décisionnel [Azapagic et Perdan, 2005a], les individus ou les organisations ayant un champ de responsabilité bien défini demeurent imputables pour les décisions qui sont prises [Munda, 2005]. Sans déléguer l'entière responsabilité du pouvoir décisionnel, une approche participative a plutôt pour objectif de stimuler le dialogue entre parties prenantes, d'exposer les préférences de chacune d'entre elles, puis de rendre plus intelligible la décision finale dans la mesure où les critères et les préférences sont clairement exprimés.

2.3.4 Participation des parties prenantes

La participation du public (ou des parties prenantes) est définie comme « un processus par lequel des citoyens [ou organisations] touchés par une décision ou intéressés à une question [...] ont la possibilité d'influer sur le contenu avant la prise de décision finale. » [CSA, 2002]. Comme il existe plusieurs niveaux de participation, une interprétation divergente du terme par les parties prenantes ou le promoteur d'un projet est susceptible de générer frustrations et déceptions. Les niveaux suivants, du plus faible au plus élevé, sont identifiés dans CSA [2002] : (1) la transmission d'information par le promoteur aux parties prenantes; (2) l'échange d'informations, de perspectives et d'opinions entre le promoteur et les parties prenantes; et (3) l'implication des parties prenantes au processus décisionnel et recherche d'une solution acceptable pour tous. De nombreux mécanismes ont été proposés pour chaque niveau de participation.

Comme elle entraîne l'expression de points de vue diversifiés, une démarche participative permet une meilleure compréhension de la situation étudiée par l'ensemble des acteurs. De plus, elle favorise l'édification d'un consensus, car elle met en relation des parties prenantes aux intérêts divergents et confronte celles-ci à la nécessité de prendre la meilleure décision possible. Cela mène habituellement à une réception plus favorable du projet étudié dans le public. Cette approche est d'autant plus intéressante dans un contexte de développement durable, car les parties prenantes ont souvent des préoccupations environnementales, sociales ou économiques bien particulières. Si celles-ci sont exprimées de façon équilibrée, l'entité en charge de prendre la décision est alors mieux placée pour évaluer les compromis propres aux options proposées [OCDE, 2002].

Vu ses avantages potentiels, la participation est considérée comme souhaitable, voire même un nouvel impératif catégorique [Barbier, 2005]. La mise en place d'une telle démarche dans le

cadre de projets techniques s'accompagne néanmoins de certaines difficultés. En premier lieu, le processus de participation publique implique des coûts, autant pour l'instigateur que pour les participants. À la lumière d'expériences récentes, il apparaît également que certaines arènes de participation soient délaissées même si elles sont facilement accessibles aux parties prenantes. Cette prise de position s'expliquerait par une certaine ironie se déclinant en deux versants, soit la « lucidité » et le « désenchantement » [Barbier, 2005]. Pour l'individu dit lucide, le processus de participation n'est qu'un exercice de façade servant à légitimer les décisions prises par d'autres, tandis que pour l'individu dit désenchanté, les décisions ne peuvent revenir qu'aux experts vu la nature complexe des phénomènes en question. Ces embûches expliquent, du moins en partie, l'échec de certaines démarches participatives. Les réussites observées illustrent toutefois que l'ironie peut être évitée lorsque des précautions adéquates sont prises.

Le processus de participation du public comprend quatre principales phases [CSA, 2002] : (1) déterminer s'il est nécessaire d'inviter le public à participer, notamment en réalisant un survol des intérêts et points de vue des parties prenantes; (2) délimiter l'ampleur de la participation, en analysant les parties prenantes et en ciblant des mécanismes potentiels; (3) planifier la participation, en définissant les parties prenantes impliquées, les activités, les ressources affectées et le calendrier d'exécution; et (4) évaluer le déroulement et la pertinence du processus de participation une fois celui-ci complété. Certains mécanismes consultatifs sont déjà en place au Québec à tous les niveaux de gouvernement (fédéral, provincial et municipal). Depuis sa création en 1978, le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) a suscité la participation du public dans le cadre de nombreux projets assujettis à l'étude des impacts sur l'environnement. La gestion participative est aussi au cœur de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant en place depuis 2002 au Québec. Des guides généraux [CSA, 2002; OCDE, 2002] ou sectoriels [BAPE, 2002; ROBVQ, 2006] sont disponibles pour en faciliter la mise en œuvre.

2.3.5 Récapitulation des outils recensés

Les outils recensés dans la revue de littérature sont catégorisés et positionnés par rapport aux étapes conventionnelles de la résolution de problème à la figure 2.5. Les outils de pensée hétérodoxe sont principalement utilisés lors de la définition du problème et de l'identification des options alors que les outils d'analyse servent surtout à l'identification des critères et à l'évaluation des options. Les outils de synthèse appuient pour leur part le processus de prise de décision. Le processus de résolution de problème est représenté de façon simplifiée à la figure 2.5, ce dernier étant itératif plutôt que séquentiel. Ceci implique que tous les types d'outils

peuvent être sollicités à divers moments de la réalisation d'un projet. De plus, les phases de la résolution de problème sont intimement liées et des outils appropriés doivent être choisis pour chacune des trois catégories (pensée hétérodoxe, analyse et synthèse). Une lacune selon une catégorie peut avoir des répercussions sur l'ensemble du processus. Par exemple, si les outils de créativité choisis ne permettent pas de générer des options originales, celles-ci se révéleront probablement insatisfaisantes lors de l'analyse.

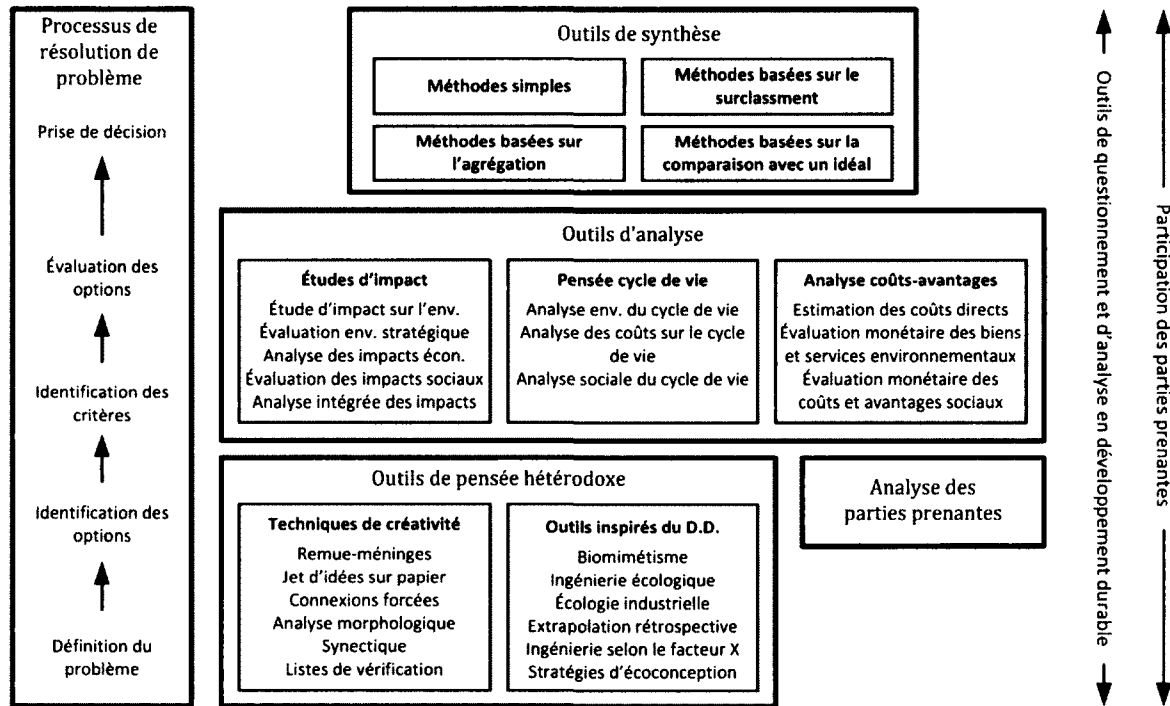


Figure 2.5 Catégorisation des outils recensés

Tel qu'illustré à la figure 2.5, il est possible d'inclure les parties prenantes dans certaines ou toutes les étapes du processus décisionnel dépendamment du niveau de participation ciblé au préalable. Le positionnement des outils de questionnement et d'analyse en matière de développement durable est pour sa part lié au fait que ceux-ci mobilisent une gamme prédéfinie d'outils de pensée hétérodoxe, d'analyse et de synthèse. Le développement durable repose également sur une intégration efficace des volets environnemental, économique et social. Les outils choisis pour les analyses doivent couvrir ces trois dimensions. Il n'est évidemment pas nécessaire, ni souhaitable, d'utiliser l'ensemble des outils présentés à la figure 2.5 lors de la réalisation d'un projet. Un choix judicieux repose sur une bonne identification des enjeux relatifs au développement durable propres au projet à l'étude, puis par la sélection d'enjeux prioritaires devant être évalués. Ces enjeux varieront en fonction de la nature du projet, de son ampleur ainsi

que du contexte dans lequel il s'insère. Les outils d'analyse les plus pertinents seront ceux se trouvant en lien direct avec les enjeux prioritaires ciblés.

Plusieurs des outils recensés sont flexibles dans leur utilisation et la plupart des sources citées aux sections 2.3.1 à 2.3.4 font référence au principe de proportionnalité. Ce dernier pose que les efforts d'analyse doivent être proportionnels à l'ampleur du projet étudié ainsi qu'avec le niveau de précision escompté. Un outil qui semble trop complexe à prime abord peut ainsi être intégré à la conception dans une version simplifiée, dans la mesure où la précision des résultats obtenus demeure compatible avec les objectifs de l'étude. Par exemple, plusieurs approches ont été développées pour faciliter la mise en œuvre de l'AECV telles les listes de contrôle, la matrice MET (matériaux-énergie-toxicité), les écoétiquettes et le calcul du profil environnemental moyen des secteurs économiques [Gendron et Revéret, 2010].

L'utilisation d'outils de développement durable implique inévitablement certains coûts supplémentaires. Ces dépenses apparaîtront justifiées dans la mesure où le client affiche un réel intérêt face à la démarche de conception durable ou alors si l'organisation responsable du projet a la volonté d'acquérir une expertise par l'intermédiaire d'études de cas. Il n'est pas rare que l'utilisation d'outils de développement durable ait des retombées positives dépassant le cadre initial d'application. La plupart des projets menés en écoconception, visant à prime abord la réduction de l'impact environnemental de produits et services, génèrent également des économies ou contribuent l'amélioration de l'image des entreprises auprès du public [Pôle d'écoconception et management du cycle de vie et Institut de développement de produits, 2009].

2.4 Conception conventionnelle

La conception conventionnelle correspond à l'approche de résolution de problèmes techniques enseignée dans les facultés de génie ou suggérée par les organisations d'ingénieur dans les guides de pratique professionnelle. L'élaboration du processus générique de conception conventionnelle à partir de la revue de littérature dans ce domaine est présentée à la section 4.3.1. Les étapes et les tâches du processus de conception conventionnelle (PCC) énumérées au tableau 2.5 sont tirées du tableau 4.2. Le PCC a été élaboré dans le but de faciliter l'identification des principales différences existant entre la conception conventionnelle et la conception durable, cette dernière étant définie à la section suivante.

Tableau 2.5 Processus de conception conventionnelle

Étapes	Tâches
Définition du problème	<ol style="list-style-type: none"> 1. Création de l'équipe de travail 2. Définition du problème, des objectifs et du contexte 3. Identification des contraintes et des données de base 4. Planification des étapes subséquentes
Étude conceptuelle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identification des fonctions à remplir 2. Génération des concepts 3. Identification des spécifications
Conception préliminaire	<ol style="list-style-type: none"> 1. Élaboration sommaire des concepts 2. Analyse préliminaire des concepts 3. Recommandation d'un concept
Conception détaillée	<ol style="list-style-type: none"> 1. Élaboration détaillée du concept retenu 2. Analyse détaillée et optimisation du concept retenu 3. Identification des exigences relatives à la construction, la fabrication, l'utilisation et l'entretien 4. Documentation et communication de la conception détaillée

2.5 Écoconception et conception durable

L'écoconception est souvent présentée comme la porte d'entrée à la conception durable. Cette démarche « permet de réduire les impacts négatifs sur l'environnement [se produisant] tout au long du cycle de vie [d'un projet et ce dès] la phase de conception. » [Thibault et Leclerc, 2007]. Tel que décrit dans le rapport technique ISO 14062 [ISO, 2002], les aspects environnementaux doivent être intégrés tout au long du processus de conception par l'intermédiaire d'actions appropriées.

L'écoconception repose sur le choix de stratégies pertinentes pour orienter le développement de solutions à moindre impact ainsi que sur des outils d'évaluation pour estimer l'ampleur des gains obtenus. Des listes exhaustives de stratégies d'écoconception ont été élaborées, notamment par Thibault et Leclerc [2007] et Crul et Diehl [2010]. L'analyse environnementale du cycle de vie est pour sa part un outil privilégié d'évaluation en écoconception, surtout à cause de sa méthodologie clairement définie et sa capacité à prendre en compte de multiples impacts environnementaux simultanément. Les principales actions propres au processus d'écoconception sont présentées au tableau 2.6. La conception durable a pour sa part une portée plus large que l'écoconception et nécessite la prise en compte de considérations non seulement environnementales et techniques, mais également économiques et sociales.

Tableau 2.6 Processus d'écoconception

Étapes	Actions
Planification	Envisager les aspects environnementaux, formuler des exigences environnementales, choisir des approches d'écoconception et faire l'analyse environnementale d'un produit de référence.
Conception préliminaire	Faire des analyses de cycle de vie, formuler des cibles mesurables, respecter les exigences environnementales, tenir compte de l'analyse du produit de référence.
Conception détaillée	Finaliser les spécifications en incluant les considérations sur le cycle de vie.
Essais et/ou prototype	Vérifier les spécifications et les critères et examiner les considérations sur le cycle de vie.
Production et lancement	Communiquer l'information sur les aspects environnementaux, l'utilisation recommandée et l'élimination du produit.
Revue du projet	Évaluer les expériences réalisées et les impacts environnementaux réels.

Plusieurs approches visant l'intégration des principes du développement durable à la conception ont été recensées à la section 4.3.3. Les tâches complémentaires les plus fréquemment relevées dans ces processus de conception durable sont présentées au tableau 2.7. À la section 4.4 est décrit comment le processus intégré de conception durable pour l'ingénierie (PICDI) mobilise les éléments des processus existants affichant le plus haut niveau de consensus et bonifie ceux-ci.

Tableau 2.7 Synthèse des processus de conception durables recensés

Étapes	Tâches complémentaires
Définition du problème	<ol style="list-style-type: none"> 1. Création d'une l'équipe de travail multidisciplinaire 2. Définition de principes du développement durable 3. Identification des enjeux liés au développement durable propres au problème à l'étude 4. Analyse des parties prenantes et planification de leur participation
Étude conceptuelle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Définition de critères de développement durable 2. Élaboration d'une vision future dans laquelle les fonctions identifiées sont remplies en respect avec les principes du développement durable 3. Définition d'indicateurs de développement durable 4. Choix d'une approche pour la prise de décision multicritère
Conception préliminaire	<ol style="list-style-type: none"> 1. Évaluation des concepts selon les indicateurs de développement durable 2. Recommandation d'un concept à l'aide de la méthode d'aide à la décision multicritère
Conception détaillée	<ol style="list-style-type: none"> 1. Évaluation détaillée du concept retenu selon les indicateurs de développement durable 2. Optimisation de la performance du concept selon les mêmes indicateurs 3. Communiquer les recommandations à propos de la fabrication, la construction, l'utilisation et la fin de vie 4. Élaborer la liste d'indicateurs de développement durable nécessaires au suivi

Tel que souligné aux sections 2.1.3, 2.2, 2.4 et 2.5 une partie non négligeable de la revue de littérature se retrouve dans les deux articles constituant les chapitres 3 et 4 de la thèse. Un dernier volet de cette revue, portant sur les enjeux du développement durable relatifs à l'assainissement des eaux usées, est maintenant abordé.

2.6 Conception durable de systèmes d'assainissement des eaux usées

Les technologies communément employées pour les systèmes d'assainissement des eaux usées, les enjeux de durabilité qui leur sont propres ainsi que de leur évaluation selon certains critères ou outils sont présentés dans cette section pour mettre en contexte les particularités associées à la conception durable des SMAEU.

2.6.1 Systèmes d'assainissement des eaux usées

Un système municipal d'assainissement des eaux usées (SMAEU) est habituellement composé de cinq éléments: (1) le branchement des bâtiments au réseau; (2) le réseau de collecte des eaux usées; (3) la station d'épuration des eaux usées; (4) le traitement des boues récupérées durant le traitement; et (5) le suivi des impacts de l'effluent dans le cours d'eau récepteur. La configuration des SMAEU est illustrée à la figure 2.6.

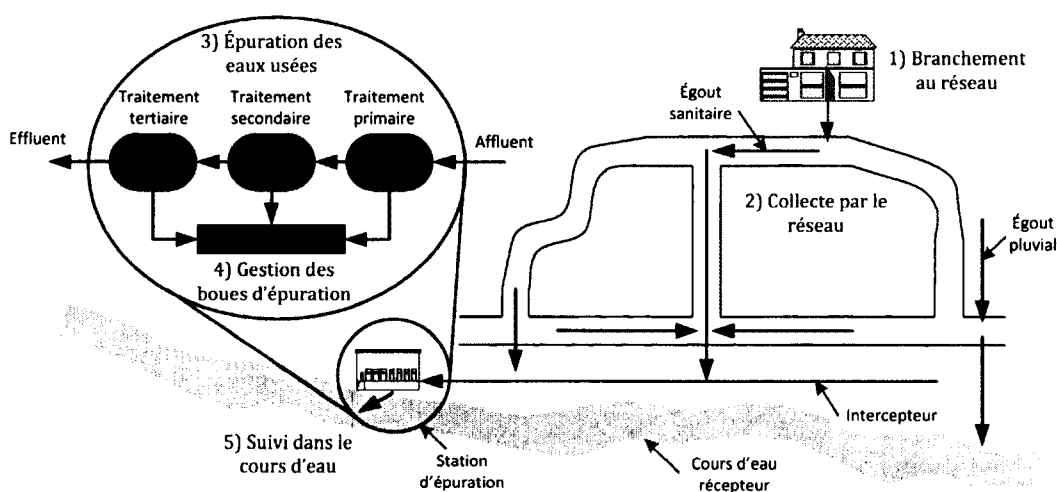


Figure 2.6 Systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées

La taille des SMAEU est reliée à la population équivalente desservie et au débit traité à la station d'épuration. Les SMAEU sont catégorisés selon les valeurs au tableau 2.8, adaptées de CCME [2009], Doka [2007] et MAMROT [2010].

Tableau 2.8 Taille des SMAEU

Taille	Très petite	Petite	Moyenne	Grande	Très grande
Pop. (pers. éq.)	< 1000	1000 à 7000	7000 à 40 000	40 000 à 80 000	> 120 000
Débit (m ³ /d)	< 750	750 à 5000	5000 à 30 000	30 000 à 90 000	> 90 000

Dans les communautés où la densité de population est faible, les systèmes décentralisés sont souvent préférés aux systèmes centralisés. Dans ce cas, il n'y a pas de réseau de collecte et l'épuration ainsi que le rejet de l'effluent traité se font à proximité des bâtiments. Des configurations différentes à celle de la figure 2.6 peuvent être adoptées lorsque les conditions locales le justifient. Par exemples, certains bâtiments intègrent des systèmes de récupération des eaux pluviales ou des eaux grises dans les régions où la disponibilité de l'eau douce est faible.

Les types de **branchement au réseau de collecte** sont : (1) unitaire (appareils domestiques, drains de fondation et bouches d'égout pluviales reliés à un égout unitaire); (2) pseudo-séparatif (appareils domestiques et drains de fondation reliés à un égout pseudo-séparatif; bouches d'égout pluviales reliées à un égout pluvial); (3) séparatif (appareils domestiques sont reliés à un égout séparatif; drains de fondation et bouches d'égout pluviales reliés à un égout pluvial) [Brière, 2006]; et (4) séparatif avancé (eaux domestiques séparées en eaux grises, contenant les savons et détergents, en eaux jaunes, soit l'urine, ainsi qu'en eaux noires, contenant les excréments) [Otterpohl *et al.*, 2004].

La collecte des eaux usées dans le réseau se fait d'une ou plusieurs façons: (1) gravitaire (écoulement par gravité vers la station d'épuration); (2) forcé par postes de relèvement (écoulement sous pression dans l'intercepteur vers la station d'épuration) [Brière, 2006]; (3) forcé par postes de pompage à basse pression (écoulement sous basse pression des résidences vers l'intercepteur); (4) forcé sous vide (écoulement par aspiration vers un réservoir de collecte, puis refoulement ou écoulement gravitaire vers la station d'épuration) [SQAE *et al.*, 1994].

L'épuration des eaux usées peut comprendre une ou plusieurs étapes: (1) prétraitement (dégrillage, dessablage et séparateur de graisses); (2) traitement primaire (bassin de décantation ou traitement physico-chimique); (3) traitement secondaire (traitement par boues activées, filtre biologique, marais filtrants, étangs aérés, etc.); et (4) traitement tertiaire (filtration au sable, filtration au charbon activé, filtration par membrane, déphosphatation chimique, déphosphatation biologique, dénitrification biologique, désinfection, etc.) [Metcalf & Eddy, 2003].

Le traitement des boues d'épuration comprend tout d'abord: (1) la réduction de la teneur en eau (épaississement, déshydratation ou assèchement) et (2) la stabilisation (ajout d'un composé alcalin, digestion ou compostage) [Metcalf & Eddy, 2003]. Suit ensuite **la valorisation ou la disposition** par: (3) valorisation énergétique (combustion du biogaz généré par digestion anaérobie, incinération avec récupération de chaleur ou gazéification); (4) élimination (enfouissement ou incinération sans récupération de chaleur); ou (5) valorisation comme matière fertilisante (épandage direct, épandage après chaulage, etc.) [Hébert, 2004]. Finalement, le **suivi dans le cours d'eau récepteur** comprend: (1) une étape d'échantillonnage (in situ, passif ou en continu) puis; (2) une étape d'analyses (physico-chimiques, par bioessais, par biomarqueurs, par biocapteurs, selon un suivi écologique, etc.) [Roig *et al.*, 2005].

2.6.2 SMAEU et enjeux relatifs au développement durable

Les réseaux de collecte des eaux usées, puis éventuellement les stations d'épuration, ont été mis en place au cours des siècles pour protéger la santé humaine, en premier lieu, ainsi que pour préserver la qualité des écosystèmes [Novotny *et al.*, 2010]. En empêchant le contact direct entre les citadins et les eaux usées, les réseaux de collecte ont grandement amélioré les conditions sanitaires dans les villes. Les stations d'épuration sont ensuite apparues essentielles à la protection des sources d'eau potable, à la conservation des usages des cours d'eau et à la préservation de l'intégrité des écosystèmes.

Les SMAEU construits dans les zones urbaines sont en très grande partie, voire même exclusivement, centralisés. Le réseau de collecte couvre un territoire de grandeur variable et dirige les eaux usées vers un lieu de traitement unique. Les SMAEU sont de taille variable, certains desservent quelques centaines de personnes tandis d'autres en desservent plusieurs millions [MAMROT, 2010]. Malgré les bénéfices apportés par les SMAEU centralisés au cours du 20^e siècle, ceux-ci ont également certains désavantages. Tout d'abord, leur mise en place, leur opération et leur remplacement exige des investissements élevés. De plus, l'atteinte de niveaux de performance supérieurs, par exemple pour l'enlèvement des nutriments, passe souvent par une consommation accrue en énergie et en produits chimiques [Foley *et al.*, 2010]. La grande étendue des réseaux de collecte ont également un impact négatif sur le rendement épuratoire, tout d'abord en raison des eaux parasites venant diluer les eaux usées, mais aussi à cause de la grande variété de contaminants présents en faible concentration. Finalement, l'invisibilité relative des infrastructures et la mentalité *flush and forget* rend plus difficile aux personnes

desservies de saisir l'importance des SMAEU ainsi que l'impact des comportements sur leur fonctionnement [Van Vliet et Stein, 2004].

L'adoption répandue de l'approche centralisée pour la gestion des eaux usées au cours du 20^e siècle s'est faite avant l'émergence des enjeux liés au concept de développement durable. La revue des critères de développement durable proposés pour les SMAEU, couverte à la section suivante donne un aperçu complet de ces enjeux. Vu l'émergence de ces nouvelles considérations, il est légitime de se demander si les systèmes centralisés sont toujours préférables. Deux écoles de pensée se distinguent par leur réponse à cette question [Hedberg, 1999; Ho et Anda, 2006; Makropoulos *et al.*, 2008]. Selon la première, les systèmes actuels sont incompatibles avec les principes du développement durable et doivent être remplacés par des systèmes à plus petite échelle basés sur des technologies écologiques. La seconde constate pour sa part que l'approche centralisée est la seule qui soit réaliste dans les zones urbaines et qu'elle doit par conséquent être ajustée pour contribuer à un développement plus durable.

La position de la première école de pensée est détaillée par Smith [2009] à l'aide de cinq principes devant guider la conception des SMAEU. Ces infrastructures doivent ainsi:

- être adaptatives, pour s'accommoder des changements démographiques ou naturels;
- être décentralisées, pour accroître la résilience face aux désastres naturels ou aux accidents de nature humaine et pour tirer profit des particularités de chaque site;
- être basées sur les processus naturels (épuration par les végétaux et les microorganismes) et sur des technologies ne dépendant pas des combustibles fossiles;
- fournir de l'eau recyclée pour usage local lorsqu'approprié et diminuer la consommation d'eau potable.
- générer des bénéfices pour plusieurs utilisateurs, en servant par exemple à l'éducation, aux loisirs et à la création d'habitat naturels.

Il est impossible de dissocier les SMAEU du contexte dans lequel ils sont mis en place. Celui-ci influence inévitablement leur configuration et par le fait même leur contribution potentielle au développement durable. Les principaux éléments de ce contexte sont :

- Les autres infrastructures d'eau, soit celles pour la production d'eau potable et le drainage des eaux pluviales [Sahely *et al.*, 2005; Malmqvist *et al.*, 2006].

- Les modes de production et de consommation des produits domestiques ou des aliments, car leurs propriétés influencent la composition des eaux usées.
- La recherche et le développement mené par les fabricants des diverses composantes nécessaires à la construction et à l'opération des SMAEU.
- Les particularités du territoire, son aménagement ainsi que la composition des collectivités, car la configuration du SMAEU doit s'y adapter [Bagley *et al.*, 2005; Ho et Anda, 2006].
- La difficulté de modifier la configuration d'infrastructures imposantes, coûteuses et dont la durée de vie est très longue [Palme, 2010].
- Les modes de gestion privilégiés par les gouvernements locaux, car ils imposent des modalités pour l'approbation des projets ainsi que pour leur financement.
- Les politiques et les programmes des paliers gouvernementaux supérieurs, car ils définissent comment sont octroyés les subventions et comment sont fixées les exigences relatives au rejet de l'effluent et à la valorisation des boues d'épuration.

Ces enjeux se transcrivent pour la plupart en critères et en indicateurs pour permettre d'évaluer la contribution des SMAEU au développement durable. Ceux-ci sont traités à la section suivante.

2.6.3 Critères et indicateurs de développement durable pour les SMAEU

Une revue de littérature exhaustive a permis de recenser 25 listes de critères et d'indicateurs de développement durable adaptés aux SMAEU. Ces listes sont décrites à l'annexe C. Le nombre et la variété de critères et d'indicateurs varient beaucoup d'une liste à l'autre. En effet, le nombre de critères varie entre 4 et 24 pour une moyenne de 11 tandis que le nombre d'indicateurs varie entre 10 et 100 pour une moyenne de 29. Alors que 10 des listes proposent uniquement des critères, trois d'entre elles proposent uniquement des indicateurs. La majorité des listes, soit 12, proposent à la fois des critères et des indicateurs. Deux d'entre elles ont même une hiérarchie à trois niveaux, où les critères primaires sont détaillés en critères secondaires avant d'être eux même évalués à l'aide d'indicateurs [Ashley *et al.*, 2004; Martin *et al.*, 2007]. Bien que l'usage des termes critères et indicateurs ne soit pas uniforme d'une liste à l'autre, leur classement se fait selon les définitions données à la section 4.3.3 :

- un *critère* correspond à une dimension selon laquelle il est possible d'ordonner une gamme de concepts de manière à en faciliter leur évaluation et la prise de décision,
- un *indicateur* est un paramètre mesurable, quantitatif ou qualitatif, permettant d'évaluer la performance d'une gamme de concepts selon un critère.

La majorité des listes, soit 19, couvrent à la fois le volet technique et les dimensions du développement durable tandis que six d'entre elles se concentrent uniquement sur les enjeux propres au développement durable. Quatre des listes ont la particularité d'associer certains critères de nature technique à l'une ou l'autre des dimensions du développement durable.

Les listes ne font habituellement pas référence à des principes ou à un cadre conceptuel. Toutefois, pour deux listes, le lien entre les critères et des principes généraux du développement durable est explicité [Grönlund *et al.*, 2004; Raval et Donnelly, 2002] tandis que dans un autre cas, leur définition se base sur un cadre conceptuel [Balkema *et al.*, 2002]. Pour les autres listes, les critères et indicateurs sont simplement classés selon les dimensions du développement durable. Néanmoins, deux de ces listes découlent des priorités des parties prenantes [Gaulke *et al.*, 2010; Hoffmann *et al.*, 2000], deux autres sont construites selon des lignes directrices pour les indicateurs de développement durable [Muga et Mihelcic, 2008; Murray *et al.*, 2009] et deux dernières font référence à des documents officiels [Mosley, 2006; Diaper et Sharma, 2007]. Les critères les plus souvent cités sont décrits au tableau 2.9. Le nombre de critères est relativement limité et il est possible de regrouper ceux-ci en un nombre restreint de catégories.

Tableau 2.9 Critères et indicateurs pour les SMAEU

Dimensions	Critères	Exemples d'indicateurs
Technique	Performance (18/25)	Taux d'enlèvement des polluants (7/18) Impact sur le milieu récepteur (4/18)
	Fiabilité (12/25)	Risque de non-respect des exigences dû à un bris (3/12)
	Flexibilité et adaptabilité (11/25)	Coûts associés à la modification du système (2/11)
Environnement	Utilisation des ressources (21/25)	Utilisation d'énergie (11/21) Utilisation du territoire (7/21) Récupération des nutriments (6/21) Utilisation d'eau (5/21)
	Impact environnemental sur le cycle de vie (16/25)	Impact sur le sol (8/16) Impact sur la qualité de l'air (4/16)
Économie	Coûts sur le cycle de vie (19/25)	Coût de construction (10/19) Coût d'opération (8/19) Coût d'entretien (7/19)
	Accessibilité (prix) (10/25)	Proportion du revenu des ménages consacré au service (2/10)
Société	Esthétique et bien-être (13/25)	Niveau de nuisance (6/13)
	Risques à la santé humaine (12/25)	Risque d'infection (1/12)
	Acceptabilité (9/25)	Niveau d'appui public à la mise en place du système (1/9)

Note : Les chiffres entre parenthèses font référence au nombre de listes incluant le critère ou l'indicateur visé par rapport au nombre total de listes.

L'identification d'indicateurs faisant consensus pour chacun des critères est plus ardue, car plusieurs n'en contiennent pas et car leur nature est très plus variée. Quelques d'indicateurs plus courants sont néanmoins donnés pour chacun des critères. Les critères et les indicateurs recensés sont utilisés à deux principales fins, soit l'évaluation de systèmes existants ou l'évaluation de variantes envisagées dans le cadre de projets de conception. La prochaine section présente les particularités propres à ces deux applications.

2.6.4 Conception et évaluation des SMAEU

La plupart des listes recensées à la section 2.6.3 ont été élaborées pour l'évaluation de systèmes existants (14) ou la conception de nouveaux systèmes (6). Qu'elles se rapportent à l'évaluation ou à la conception, ces études ciblent un ou plusieurs sous-systèmes d'un SMAEU et considèrent un nombre variable d'options. Elles mobilisent aussi différentes approches en ce qui concerne la priorisation des critères, l'analyse des options et la synthèse des données. Le tableau 2.10 présente la synthèse des études recensées.

Tableau 2.10 Sommaire des études visant l'évaluation et la conception des SMAEU

Sous-systèmes	Nombre d'options	Priorisation des critères	Outils d'analyse (critères D.D.)	Outils de synthèse
Épuration (18) Collecte (8) Traitement des eaux pluviales (4) Réutilisation des eaux usées (3) Traitement des boues (2)	1 à 11 (moyenne de 4)	Aucune (8) Équipe de conception (4) Parties prenantes (4) Non spécifié (3) Organisation responsable (1)	Estimation des coûts (11) Estimation des revenus (1) AECV (4) Analyse de l'énergie (1) Analyse de l'exergie (1) Autres analyses quantitatives (5) Jugement expert semi-quantitatif (10) Sondage auprès de la population (3) Sondage auprès des employés (1) Jugement expert qualitatif (3) Entrevues qualitatives auprès des utilisateurs (1)	Aucun (7) Somme pondérée (4) AHP (1) SMART (1) Diagramme radar (4) ELECTRE (4) PROMETHEE (2) Programmation du compromis (1)

Les études recensées considèrent habituellement un ou deux sous-systèmes, la station d'épuration étant le sous-système le plus souvent évalué. Le nombre d'options pris en compte varie beaucoup d'une étude à l'autre, mais correspond à quatre en moyenne. Dans la plupart des cas, les critères ne sont pas priorisés, ce qui signifie que les résultats ne sont pas synthétisés ou qu'ils sont représentés à l'aide d'un diagramme radar. La priorisation des critères est utilisée dans la plupart des projets de conception pour guider la prise de décision, mais n'apparaît pas

essentielle lorsqu'un système existant est évalué. L'importance relative des critères est habituellement évaluée par l'équipe de conception ou par un groupe de parties prenantes.

Les outils d'analyse les plus couramment utilisés sont l'estimation des coûts ainsi que le jugement expert selon une échelle ordinale ou par intervalle. L'AECV ou des approches reliées (analyse de l'énergie ou de l'exergie) sont également fréquentes. Finalement, les outils de synthèse utilisés sont très variés, allant des plus simples (la somme pondérée ou le diagramme radar) aux plus complexes (celles basées sur le surclassement).

Aucune étude portant sur un projet de conception ne fait référence à l'usage d'outils de créativité pour la génération des options. Néanmoins, un nombre restreint d'études inclut une ou plusieurs alternatives au système centralisé en milieu urbain et sept d'entre elles comparent directement les solutions conventionnelles aux solutions alternatives. D'après ces études, il n'est pas possible de déterminer quelle avenue est préférable, car chacune est plus ou moins performante selon différents critères [Agudelo *et al.*, 2007; Burkhard *et al.*, 2000; Hellstrom et Jonsson, 2006; Hoffman *et al.*, 2000; Markropoulos *et al.* 2007; Palme *et al.* 2005]. Cependant, le traitement des eaux usées par microalgues est considéré nettement supérieur aux technologies conventionnelles dans Grönlund *et al.* [2004].

Les outils recensés au tableau 2.10 ne sont pas seulement utilisés en combinaison dans une perspective d'évaluation du développement durable, mais sont également appliqués sur une base individuelle. La synthèse de telles applications réalisées dans le domaine de l'assainissement des eaux usées est réalisée à la section suivante.

2.6.5 Outils du développement durable appliqués aux SMAEU

Les outils dont l'application aux SMAEU a été relevée dans la littérature sont l'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE), l'analyse des impacts sociaux, l'analyse de l'équité, l'évaluation des biens et services environnementaux, l'AECV et l'analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV),

Les quelques ÉIE recensées font référence à l'impact environnemental des effluents, mais non à celui de la construction et de l'opération des infrastructures [BAPE, 1992; Holliday, 2001; Kontos, 1996]. Au Québec, les projets subventionnés par les gouvernements font l'objet d'un examen préalable, mais très rarement d'une ÉIE complète. L'analyse sur les impacts sociaux est aussi peu appliquée aux projets en assainissement des eaux usées [Dey et Husbands, 2005; Prasanta Kumar et Calvin 2005]. Dans les deux études identifiées, les impacts sociaux ne sont pas abordés

selon le cadre décrit à la section 2.3.2, mais se rattachent plutôt à des problèmes spécifiques survenant lors de la construction (impact sur le tourisme, trafic routier, etc.) ou durant l'opération (odeurs, impact sur la santé, etc.). Tout comme l'ÉIE et l'analyse des impacts sociaux, peu d'études sur l'analyse de l'équité ont été soulevées dans la littérature [Garcia-Valinas, 2005; Raftelis Financial Consultants, 2006; Teodoro, 2005]. L'équité est abordée en termes de coût payé par volume d'eau consommé dans les trois études recensées et deux d'entre elles portent sur la distribution de l'eau potable et non l'assainissement des eaux usées.

L'évaluation monétaire des biens et services environnementaux est une méthode se prêtant bien à l'analyse des SMAEU comme leur principale fonction est de préserver la santé humaine et les écosystèmes. Des 10 études identifiées, huit ont retenu la technique de l'évaluation des contingences [Atkins et Burdon, 2006; Choe *et al.*, 1997; Genius *et al.*, 2005; Kontogianni *et al.*, 2003; Rollins *et al.*, 1997; Tapvong et Kruavan, 1999; Tziakis *et al.*, 2008; Whittington *et al.*, 1994]. Hensher *et al.* [2005] font appel à la méthode des choix multi-attributs (*stated choice experiments*) tandis que Hernandez-Sancho *et al.* [2010] ont évalué les coûts nécessaires au traitement des principaux contaminants des eaux usées. Autant les projets d'amélioration des infrastructures existantes que ceux prévoyant la mise en place de SMAEU ont été analysés. La volonté de payer (VDP) pour la mise en place d'infrastructures permettant l'amélioration de la qualité des cours d'eau est très différente entre les pays industrialisés et les pays en voie de développement. Ceci s'explique par le fait que la VDP est fortement corrélée au revenu des ménages. Dans les études nord-américaines et européennes recensées, la VDP mensuelle par ménage pour l'amélioration de systèmes existants va de 7,50\$ à 42,50\$, tandis que la VDP pour la mise en place d'infrastructures d'assainissement varie entre 34,40\$ et 79,40\$. Évidemment, la VDP exprimée dépend des caractéristiques socio-économiques des ménages, des préférences des individus ainsi que de l'état des plans d'eau avant et après l'intervention proposée.

De nombreuses AECV portant sur l'assainissement des eaux usées ont aussi été recensées dans la littérature. La plupart d'entre elles visent spécifiquement les stations d'épuration [Benetto *et al.*, 2009; Dennison *et al.*, 1998; Dixon *et al.*, 2003; Emmerson *et al.*, 1995; Foley *et al.*, 2010; Gallego *et al.*, 2008; Hospido *et al.*, 2004; Machado *et al.*, 2007; Memon *et al.*, 2007; Renou, 2006; Tangsubkul *et al.*, 2005; Weiss *et al.*, 2008]. Un petit nombre d'études ciblent la gestion des boues [Beavis et Lundie, 2003; Houillon et Jolliet, 2005; Murray *et al.*, 2008] alors que certaines incluent à la fois la collecte et le traitement [Lundin *et al.*, 2000, Tillman *et al.*, 1998]. De plus,

quelques études couvrent l'ensemble du cycle de l'eau, du captage de l'eau brute jusqu'au rejet de l'effluent épuré [Lassaux *et al.*, 2006, Lundie *et al.*, 2004, Tidaker *et al.*, 2006]. Les systèmes les plus fréquemment étudiés sont ceux implantés dans les grandes communautés. Quelques AECV ont aussi été réalisées sur des SMAEU desservant des communautés de quelques milliers de personnes, des quartiers ou des résidences isolées. Toutefois, aucun des systèmes étudiés ne possède un réseau de collecte ou une station d'épuration dont la configuration est similaire à celle du SMAEU analysé aux chapitres 6 et 7.

Parmi les 20 AECV citées, sept excluent la phase de construction et seules six incluent la phase de fin de vie [Emmerson *et al.*, 1995; Gallego *et al.*, 2008; Lundin *et al.*, 2000; Machado *et al.*, 2007; Houillon et Jolliet, 2005; Weiss *et al.* 2008]. Dans ces cas, la fin de vie s'est avérée avoir un impact négligeable. La comparaison des résultats en termes absolus est difficile, voire impossible, car le champ d'étude varie d'une AECV à l'autre, tout comme les méthodes d'évaluation des impacts utilisées. De plus, certaines études se limitent à l'analyse de l'inventaire, sans procéder à l'évaluation des impacts. En termes relatifs, la phase d'opération domine dans la plupart des AECV pour la contribution aux changements climatiques et à la consommation des ressources. Pour les technologies passives, la contribution de la phase de construction est toutefois similaire à celle de la phase d'opération. Les autres catégories d'impact ciblées dans la majorité des études sont l'eutrophisation et l'écotoxicité. Le rejet de l'effluent à la station d'épuration s'avère le principal contributeur pour l'eutrophisation tandis que la valorisation agricole des boues d'épuration domine pour l'écotoxicité.

Renou [2006] met en évidence que le flux fonctionnel des SMAEU, soit le rejet de l'effluent épuré dans le milieu récepteur, a la particularité d'être associé à des émissions dans l'environnement. Ainsi, l'ensemble des AECV recensées incluent les émissions dans l'eau à la station d'épuration dans l'inventaire. Il est pertinent d'inclure les émissions à l'effluent si l'objectif est de quantifier les bénéfices et impacts découlant d'exigences plus strictes [Foley *et al.*, 2010] ou d'élaborer un inventaire générique utilisé dans d'autres études. Toutefois, si l'on admet que le respect des exigences de rejet permette au SMAEU d'accomplir sa fonction, il apparaît préférable de ne pas inclure les impacts de l'effluent dans le milieu récepteur. En dernier lieu, Renou *et al.* [2008] mettent aussi en évidence que les modèles utilisés pour l'évaluation des impacts en AECV ne peuvent prendre en compte les particularités des milieux récepteurs et sont peu adaptés pour évaluer la contribution de l'effluent à l'eutrophisation ou la toxicité.

La valorisation des boues d'épuration dans les AECV portant sur les SMAEU est un second sujet sensible. Selon ISO [2006b], les activités associées au recyclage peuvent être traitées par l'allocation ou l'extension des frontières, la seconde étant préférable à la première. Les diverses variantes envisageables pour modéliser cette phase du cycle de sont énumérées au tableau 2.11.

Tableau 2.11 Modélisation de la valorisation des boues d'épuration en AECV

Approche	Description	Application aux SMAEU
Allocation selon le contenu recyclé [Frischknecht, 2010]	L'impact de la fabrication d'un matériau est alloué au système à l'étude tandis que l'impact de son recyclage est alloué au système le récupérant en fin de vie.	L'impact de la valorisation agricole des boues est alloué à la production agricole.
Allocation selon les fardeaux évités [Frischknecht, 2010]	L'impact du recyclage ainsi que le crédit pour la production de matériau vierge évité sont alloués au système à l'étude.	L'impact de la valorisation agricole des boues et le crédit dû à une consommation réduite en fertilisant sont alloués au SMAEU.
Allocation économique [Jolliet <i>et al.</i> , 2010]	L'impact du recyclage est alloué au système à l'étude si un matériau a une valeur négative (déchet) ou au système récupérant le matériau s'il a une valeur positive (coproduit).	L'impact de la valorisation agricole est alloué à la production agricole si les boues sont considérées un produit ou est alloué au SMAEU si les boues sont considérées un déchet.
Extension des frontières du système [Jolliet <i>et al.</i> , 2010]	Les divers scénarios comparés doivent avoir la même fonctionnalité, c'est-à-dire générer des sous-produits ayant des fonctions équivalentes.	Toutes les options doivent considérer une fertilisation équivalente des sols, soit par la valorisation des boues ou l'application de fertilisants.

Le choix de l'approche pour l'allocation s'avère surtout avoir une influence sur les catégories d'impact associées à la qualité des écosystèmes [Benetto *et al.*, 2009]. De plus, les résultats obtenus par l'allocation selon les fardeaux évités ou l'extension des frontières du système sont affectés par le produit remplacé par les boues d'épuration (fertilisant, énergie ou autre).

Comparativement à l'AECV, peu d'ACCV sont recensées dans le domaine de l'assainissement. Celles-ci ciblent soit le réseau de collecte [Lim *et al.*, 2009; Vipulanandan et Pasari, 2005], le traitement des boues [Murray *et al.*, 2008], la station d'épuration [Rebitzer *et al.*, 2003; Tsagarakis *et al.*, 2003] ou le cycle de l'eau en entier [Renzetti et Kushner, 2004]. Dans ces études, la phase d'opération et d'entretien apparaît avoir des coûts supérieurs aux autres phases, principalement à cause des dépenses en énergie et en main d'œuvre. Maintenant que les particularités propres à l'évaluation de la durabilité et à la conception durable dans le domaine de l'assainissement des eaux usées ont été présentées, les implications du développement durable pour la pratique de l'ingénierie ainsi que la conception sont exposées plus en détail.

Chapitre 3 DÉVELOPPEMENT DURABLE ET INGÉNIERIE

Avant-propos

Titre : Sustainable development in engineering: a review of principles and definition of a conceptual framework

Auteurs et affiliations :

B. Gagnon : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

R. Leduc : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

L. Savard : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté d'administration, Département d'économie.

Date d'acceptation : 20 juillet 2009.

État de l'acceptation : version finale publiée.

Revue : Environmental Engineering Science.

Référence [Gagnon *et al.*, 2009]

Titre français : Le développement durable en ingénierie : revue des principes et définition d'un cadre conceptuel.

Contribution au document :

La première moitié de l'article (sections 3.1 à 3.4) vient compléter la revue de littérature sur le développement durable et sur son application en ingénierie, tel que décrit dans le chapitre 2. La seconde moitié (sections 3.5 à 3.8) présente comment le cadre conceptuel sur le développement durable et l'ingénierie a été élaboré, puis discute de son utilité potentielle, plus particulièrement pour la pratique du génie et la formation des ingénieurs. Le cadre conceptuel est l'un des éléments originaux de la thèse et occupe une place importante dans le processus intégré de conception durable en ingénierie (PICDI) proposé par la suite au chapitre 4.

Résumé français :

Cet article propose un cadre conceptuel sur l'ingénierie et le développement durable décrivant les principaux liens existant entre les projets réalisés par les ingénieurs ainsi que les systèmes environnementaux et sociaux. La revue, l'analyse et la synthèse des principes généraux du développement durable ainsi que ceux propres à l'ingénierie durable est tout d'abord réalisée. Une attention particulière est accordée aux principes proposés par les organisations d'ingénieurs nationales et internationales. Les enjeux clés identifiés par cette analyse sont présentés sous la forme de listes structurées de principes, autant pour le développement durable en général que pour l'ingénierie durable. Ensuite, de nombreux concepts et modèles issus des sciences sociales ou naturelles sont décrits de manière à mieux identifier comment les différentes dimensions du développement durable sont associées. Le cadre conceptuel proposé combine, de manière pertinente pour l'ingénierie, des éléments tirés des concepts et modèles étudiés. Les projets d'ingénierie ainsi que les systèmes physiques et sociaux y apparaissent comme étant liés de multiples façons. Même si les relations typiques sont décrites dans le cadre conceptuel, ce dernier doit être développé par ses futurs utilisateurs de manière à prendre en compte les spécificités propres aux différents domaines du génie. Une nouvelle définition systémique du développement durable basée sur le cadre conceptuel est aussi proposée. Celle-ci amène une perspective différente selon laquelle les principes de l'ingénierie durable peuvent être étudiés. Finalement, les applications du cadre conceptuel pour la pratique de l'ingénierie et la formation des ingénieurs sont discutées.

Abstract:

This paper aims to provide engineers and the engineering community with a sustainability conceptual framework setting out the connections linking engineering projects to environmental and social systems. The main principles of sustainable development on the one hand and of sustainable engineering on the other hand are first reviewed, analyzed and synthesized. Particular attention is paid to the principles put forward by international and national engineering organizations. Key issues emerging for sustainable development in general and sustainable engineering are identified through structured lists of principles. Second, concepts and models originating in natural and social sciences are outlined to shed more light on the ways the various aspects of sustainability are related. The conceptual framework we propose combines the reviewed concepts and models in a relevant manner for sustainable engineering. Engineering projects and physical or social systems prove to be related in manifold ways. While the most common relations are exposed in the sustainability framework, others have to be further elaborated by eventual users in order to fully take into account the specificities of the various fields of engineering. Based in part on the framework, a novel systemic definition of sustainable development is also proposed. This definition brings forward a new perspective along which the relevance of the proposed principles can be examined. Finally, applications of the sustainability framework in engineering practice and engineering education are discussed.

Keywords: Sustainability, Complex systems, Sustainable systems engineering, Sustainability framework.

3.1 Introduction

More than 20 years have elapsed since the publication of Our Common Future, the United Nations report which coined the most widely used definition of sustainable development: “a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” [World Commission on Environment and Development, 1987]. Since then, the notion has often been tentatively redefined and interpreted by individuals and organizations in connection with various fields. While this has led to a deeper understanding of the concept and helped towards its dissemination to a broader audience, it also caused confusion about the true meaning of the term. Since individuals and organizations have different backgrounds, values, interests and responsibilities, disagreements on such a multi-faceted subject as sustainability cannot completely vanish. Nevertheless, closer examination of the various interpretations of sustainable development proposed so far can clarify the situation by bringing forward a number of concurring elements. The purpose of this paper is to provide the engineering community, and by extension, the business community and policy makers, with a conceptual framework illustrating the relations between technical projects, society and the environment. In that perspective, general and engineering-specific principles of sustainable development are first reviewed then analyzed and synthesized. Concepts and models pertinent to sustainability rooted in natural and social sciences are also reviewed. We then propose a framework for sustainable engineering that draws on the principles, models and concepts reviewed according to a systemic perspective. The framework first serves to examine the dynamics and interrelations between the most relevant issues of sustainability previously identified. Secondly, the significance of this framework for engineering practice and for educational purposes is discussed.

3.2 General principles of sustainable development

Principles are often needed to provide more precise guidance for action than do definitions. Not surprisingly, many different sets of principles relating to sustainable development have been proposed over the years. Although all of the principles found in the literature cannot be listed, those reviewed in Table 3.1 offer a broad overview of the main themes connected with sustainability. As inspired from Edwards [2008], the following criteria guided the selection of the literature:

- Emphasis on peer-reviewed articles and official documents (international organizations or governments);

- Balance between sets of principles proposed by researchers, international organizations and governments;
- Reference to broad principles relevant for the whole society.

The principles found in the literature were studied using thematic content analysis [Sabourin, 2004], following five main steps. This procedure builds upon the one elaborated by von Hauff and Kleine [2006] to analyze areas of actions and indicators found in sustainable development strategies.

Table 3.1 General principles of sustainable development

Reference	Principles and comments
[A] World Commission on Environment and Development [1987]	Our Common Future marks the emergence of sustainable development as an authorized concept. The report lists seven strategic imperatives encompassing what is now known as the economic, social and environmental dimensions of sustainable development.
[B] Ceres [1989]	The Ceres principles are a ten-point code of conduct for companies: Protection of the biosphere; Sustainable use of natural resources; Waste reduction and disposal; Energy conservation; Risk reduction; Safe products and services; Environmental restoration; Information for the public; Management commitment; Audits and reports.
[C] United Nations [1992]	The Rio Declaration on Environment and Development contains 27 principles dealing with: Environmental protection; Poverty alleviation; International collaboration; Production and consumption; Capacity-building; Participation; Precaution; and Peace.
[D] Houghton [1999]	There are five key equity principles to sustainable development: Equity within and between generations, Geographic equity or cross-border responsibility; Procedural equity and Equity between species composing biodiversity.
[E] Earth Charter Initiative [2000]	The Earth Charter is based on four themes: Respect and care for the community of life; Ecological integrity; Social and economic justice; Democracy, nonviolence and peace. These four themes are then each broken down into four more detailed principles.
[F] Valentin and Spangenberg [2000]	Principles of sustainable development are structured around four thematic imperatives (one for each dimension, i.e., economic, social, environmental and institutional) and six inter-thematic links (one for each bi-dimensional interconnection).
[G] Robèrt <i>et al.</i> [2002]	Ten authors present four principles of sustainability making up the Natural Step Framework, as well as 13 principles of sustainable development which can be applied in more practical terms.
[H] Parris and Kates [2003]	Three elements are to be sustained (Nature, Life support and Community) and three elements are to be developed (People, Economy and Society). Two or three goals are defined for each element, for a total of 17 sustainable development goals.
[I] Becker [2005]	Sustainable systems are assumed to have three general characteristics (Resilience, Self-sufficiency and Collaboration) which, in turn, are subdivided into three indicators to facilitate their measurement.
[J] Swiss Federal Statistical Office [2005]	Sustainable development is defined by three main elements (Social solidarity, Economic efficiency and Ecological responsibility) and by 45 postulates classified in 20 categories.

Table 3.1 General principles of sustainable development (continued)

Reference	Principles and comments
[K] United Kingdom Government [2005]	The UK Sustainable development strategy contains five principles: Living within environmental limits; Ensuring a strong, healthy and just society; Achieving a sustainable economy; Promoting good governance; and Using sound science responsibly. Many countries (Sweden, France, etc.) adopted such strategies.
[L] Government of Manitoba [1997] and [M] Government of Quebec [2006]	The Government of Manitoba and Quebec adopted Sustainable Development Acts respectively defining 13 and 16 principles. Other governments passed similar legislation: Estonia (1995), Belgium (1997), Oregon (2001), Luxemburg (2004) and Canada (2008).
[N] Villeneuve [2007]	Four dimensions (ecological, economic, social and ethical) are used to define sustainable development and 8 objectives are derived from these definitions.

The literature was first selected according to the criteria adapted from Edwards [2008]. A total of 212 principles were identified. Secondly, categories along which principles could be classified were defined. These categories are based on the three pillars (or dimensions) of sustainability: environment, economy and society. Seven categories were selected for the analysis: one for each of the three pillars, one for each of the three links between pairs of pillars and a final one relating to the three pillars simultaneously. Third, the pillars were broadly delineated in order to provide exclusive, but flexible, categories. The environmental dimension refers to living organisms and the physical constituents (air, water and soil) with which they interact in ecosystems. The economic one concerns the production of goods and services that meet various needs. The social pillar relates to the structure underlying interactions between individuals or groups as well as the consequences this structure has on the well-being of individuals. Fourth, the 212 principles reviewed were classified into the seven categories above. The common elements emerging from the principles in each category were lastly synthesized into two principles for each of the uni-dimensional and bi-dimensional categories and into three principles for the tri-dimensional category. The number of principles in each category is presented in Figure 3.1.

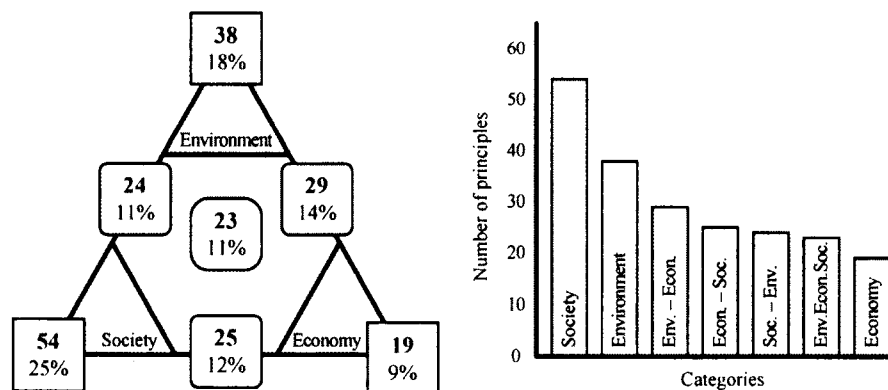


Figure 3.1 Categorization of the general principles reviewed

The uni-dimensional categories relating to society (54) and environment (38) hold most of principles, with 92 out of the 212 total principles. However, a greater variety of issues are covered in the principles classified in the social category than the environmental category. Hence, there might be a need to classify social principles into more precise categories to better tackle the variety of issues expressed. On average, multi-dimensional categories tend to hold less principles than uni-dimensional ones, to an even greater extent that the numbers in Figure 3.1 might first suggest. Indeed, multi-dimensional principles are often closer to a combination of two or three uni-dimensional issues (e.g. Consumption of goods and services should be as environmentally compatible and socially just as possible) than to original issues located at the interface of the dimensions (e.g. Prices should reflect the scarcity of natural resources and sinks and include external costs). The environment-economy interface is the multi-dimensional category with the largest number of principles (29) while, paradoxically, the economic category holds the lesser number of principles (19). A comprehensive list of 15 sustainable development principles reflecting the key issues identified is given in Figure 3.2.

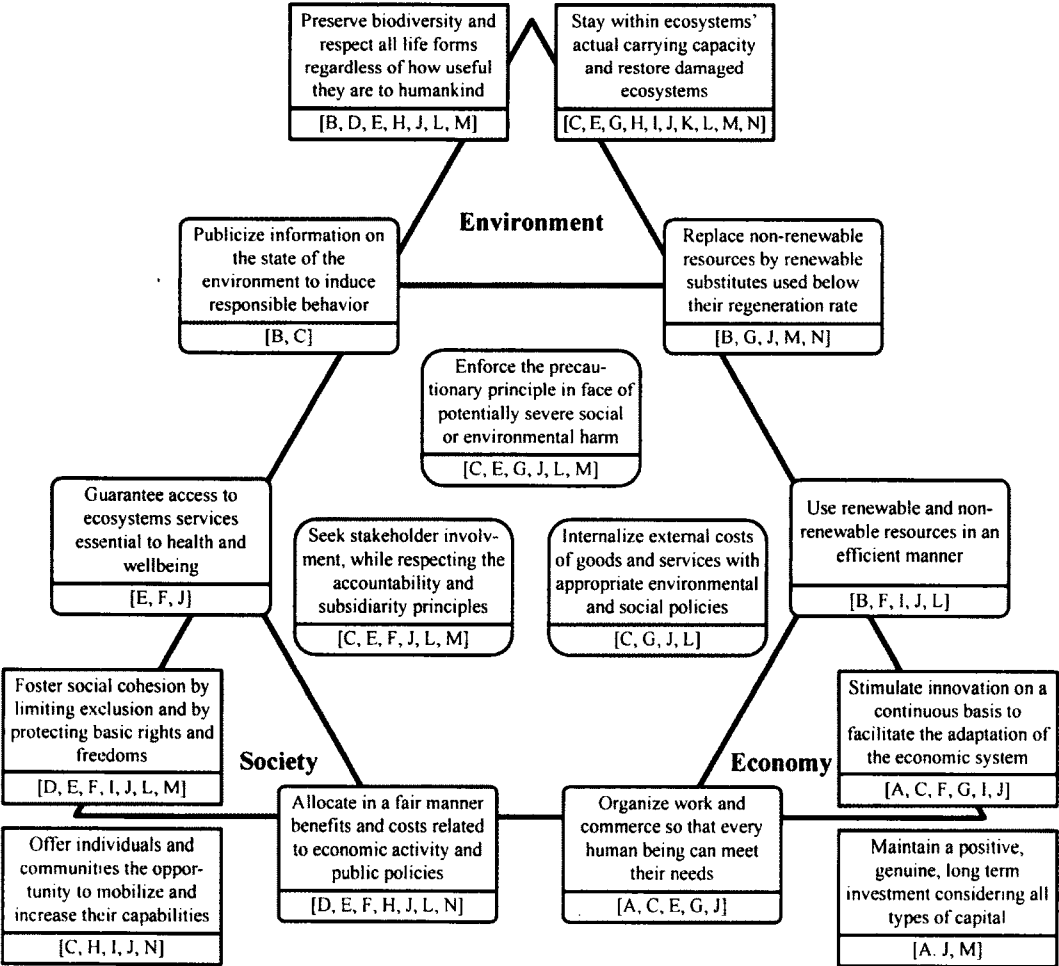


Figure 3.2 Proposed sustainable development principles (letters refer to Table 3.1)

The number of principles proposed is consistent with the lists found in the reviewed literature, which range from 5 to 45 principles with an average of 15. As mentioned before, their choice and formulation is on the one hand based on the consensus in the field and on the other hand influenced by the equal importance given to each dimension of sustainability. As illustrated by the letters associated with references from Table 3.1, 12 out of the 15 proposed principles are inspired by four or more sources. The environmental dimension proved to be the category where the strongest consensus was observed, while key issues relating to the society-environment interface were the most difficult to identify. The principles in the middle of Figure 3.2 were formulated in a slightly different manner than the other ones, since the tri-dimensional principles reviewed were often combinations of uni-dimensional or bi-dimensional issues. They were thus derived from principles originally formulated as uni-dimensional or bi-dimensional which proved to cover all dimensions. In addition to the references in Table 3.1, several sets of principles focusing on specific dimensions (economic, social, human, environmental, institutional and ethical) were considered while formulating the few principles based on a weaker consensus.

Figure 3.2 is built as a symmetrical construct because the three common dimensions of sustainable development (environment, society and economy) must simultaneously be considered to offer a comprehensive coverage. This representation builds upon the prism of sustainability [Valentin and Spangenberg, 2000] as well as on the fractal triangle of sustainability [McDonough and Braungart, 2002] and the integrative sustainability triangle [von Hauff and Kleine, 2006]. The principles which are closer to the extremities of the triangle (boxes with sharp corners) are one-dimensional while those in between angles (boxes with round corners) are bi-dimensional. The latter principles have a stronger connection with the angle they are closer to. We improve upon models previously cited by providing two detailed principles for every pillar and linkage. We also add three-dimensional principles (boxes with rounder corners) in the middle of the triangle, each of them being positioned according to their links with the angles. The entire triangle comprises 15 principles, but can also be broken down into pentagons relating to the three dimensions of sustainability, each made of two one-dimensional, two bi-dimensional and one three-dimensional principles.

The principles in Figure 3.2 are wide enough to cover almost every kind of activity. Obviously, some uncertainty exists about the choice, comprehensiveness and interpretation of the principles proposed. A particular source of bias is associated with the fact that the vast majority

of literature on sustainability comes from developed countries. Despite their uncertain nature, the validation of the principles is currently a difficult task since it relies on their widespread and long term application. Nevertheless, their relevance will later be discussed based in part on recent advances towards a well-founded theory, or normative justification, for sustainable development [Schultz *et al.*, 2008]. The next section provides additional details on the principles associated with engineering.

3.3 Sustainable development principles for engineering

Sustainable engineering principles are mentioned in numerous references which cannot all be listed in Table 3.2. Again inspired by Edwards [2008], the literature was selected according to the following criteria:

- Emphasis on peer-reviewed articles and documents elaborated by engineering organizations;
- Balance between sets of principles proposed by researchers and organizations;
- Reference to broad principles covering all dimensions of sustainability and relevant for engineering practice in general.

Table 3.2 Sustainable engineering principles

	Reference	Comments
International	[A] International Federation of Consulting Engineers [FIDIC, 2000]	In a strategy paper dedicated to <i>Sustainable Development in the Consulting Engineering Industry</i> , the FIDIC lists 18 objectives categorized along the environmental, economic and social dimensions of sustainable development.
	[B] World Federation of Engineering Organizations [WFEO, 2004]	The WFEO adopted the <i>Shanghai Declaration on Engineering and Sustainable Development</i> , stating that engineers should take greater responsibility for shaping the sustainable future and must thus commit to: Ethics; Interdisciplinarity; Education and capacity building; Women and gender issues; International cooperation.
National	[C] Institution of Civil Engineers [ICE, 2003] (United Kingdom)	According to ICE, sustainable engineering solutions: Strike an informed balance in terms of costs, benefits, sustainability and acceptability; Fit within the broader legislative framework; Involve an assessment of whole life cycle costs.
	[D] Institute of Professional Engineers of New Zealand [2004]	Sustainable development focuses on three principles: Maintaining the viability of the planet; Providing equity within and between generations; Solving problems holistically. Those principles, which prove to be similar to the objectives adopted by Engineers Australia [2005], are detailed in 17 guidelines.
	[E] Instituto de la Ingenieria de Espana [IIE, 2005]	IIE's <i>Manifiesto for Sustainable Development</i> contains 13 principles and explains how the principles can be applied when designing plans, programs, projects and works or when operating systems already in use.

Table 3.2 (continued)

	Reference	Comments
National	[F] The Royal Academy of Engineering [2005] (United Kingdom)	Twelve guiding principles are defined on the basis of case studies illustrating the issues connected to sustainable development in engineering. The document also illustrates how the principles can be applied during an engineering project.
	[G] Canadian Society for Civil Engineering [CSCE, 2006]	Civil engineering practice should follow nine guidelines: Including sustainability in values; Protecting and enhancing environment; Considering true life cycle costs; Adopting green construction; Keeping informed on environmental issues; Meeting basic human needs; Providing leadership on sustainable development; Including other professionals and stakeholders; Continuously improving existing projects.
	[H] Engineers Canada [2006]	Engineers Canada adopted the <i>National Guideline on Environment and Sustainability</i> containing nine guidelines to help engineers fully implement their commitment to environmental protection and safeguarding public well-being.
Researchers	[I] Loucks and Gladwell [1999]	An exhaustive list of sustainability guidelines for water resource systems engineers was ordered along six main topics: Design, management and operation of physical infrastructure; Environment and ecosystems; Economics and finance; Institutions and society; Health and human welfare; Planning and technology.
	[J] Clift and Morris [2002]	Engineers do not only have to find the best technical solution to a given problem, they should also consider whether: the most appropriate technology is being used; the uncertainty of science is factored in; waste and pollution are avoided while preserving resources; and whether social benefits and acceptance are maximized.
	[K] Anastas and Zimmerman [2003]	Green engineering has 12 principles: Inherent rather than circumstantial; Prevention instead of treatment; Design for separation; Maximize efficiency; Output-pulled versus input-pushed; Conserve complexity; Durability rather than immortality; Meet need, minimize excess; Minimize material diversity; Integrate local material and energy; Design for commercial afterlife; Renewable rather than depleting.
	[L] Abraham [2006]	Generally speaking, sustainable engineering solutions are technologically and economically viable, they promote human welfare and health as well as the biosphere at large. The author proposes nine principles to detail this definition.
	[M] Fenner <i>et al.</i> [2006]	An eight-point framework complementing the conventional issues of cost, time and quality is proposed: Ethical foundation; Future vision; Interlinking scales; Systems context; Holistic financial accountability; Maintenance of natural capital; Efficient coordinated infrastructure; and Justice through participation.

A number of national engineering organizations have adopted detailed lists of sustainable development principles (Australia, Canada, Spain, New Zealand and United Kingdom). However, a few others include a statement on sustainable development into their Code of ethics (Finland – TEK, Netherlands – KIVI NIRIA and United States - NSPE). The principles specific to engineering were studied with the same method as the one for general principles in Table 3.1. A total of 152 principles were identified in the 13 references, the lists ranging from 3 to 32 principles for an average of 12.

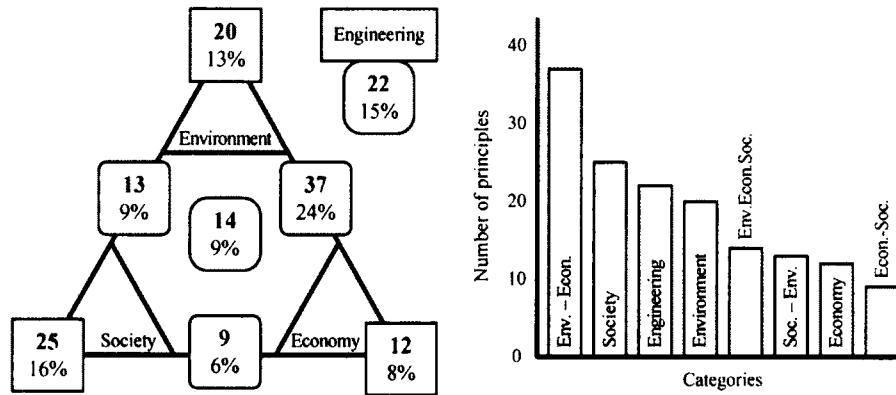


Figure 3.3 Categorization of the sustainable engineering principles reviewed

The category in which the most principles were classified is, by far, the environment-economy interface (37). Environmental concerns are indeed very often expressed in terms of resource use. As it is observed for the general principles, the social (25) and environmental (20) categories also contain a large number of principles relating to engineering. Other categories hold a similar number of principles, well below the three categories first mentioned. Figure 3.3 includes an eighth category, absent in Figure 3.1, covering themes related to engineering practice itself. It relates to general issues such as commitment to sustainability values and principles, design and management strategies following from sustainable engineering principles, professional development, etc.

A comprehensive set of sustainable engineering principles is proposed in Figure 3.4. As for the principles in Figure 3.2, their choice was mainly based on consensus. Furthermore, the principles specific to engineering were formulated to be coherent with the general principles presented in Figure 3.2, since the latter give a strong foundation with which consistency must be maintained.

Most of the principles (9 out of 15) in Figure 3.4 draw on four or more references and are coherent with the issues covered by the general principles in Figure 3.2. Other principles based on a weaker consensus are almost exclusively related to categories for which few principles were proposed in the beginning. The only exception is the social category, for which principles cover a limited range of issues and for which concerns about stakeholder participation dominate. For these remaining six principles, issues consistent with those identified in Figure 3.2 were favoured to fill the gaps. The list of sustainable engineering principles proposed in Figure 3.4 is thus meant to be stand-alone, since it relies on key issues relating to sustainability in the field of engineering and is completed by principles consistent with more general issues.

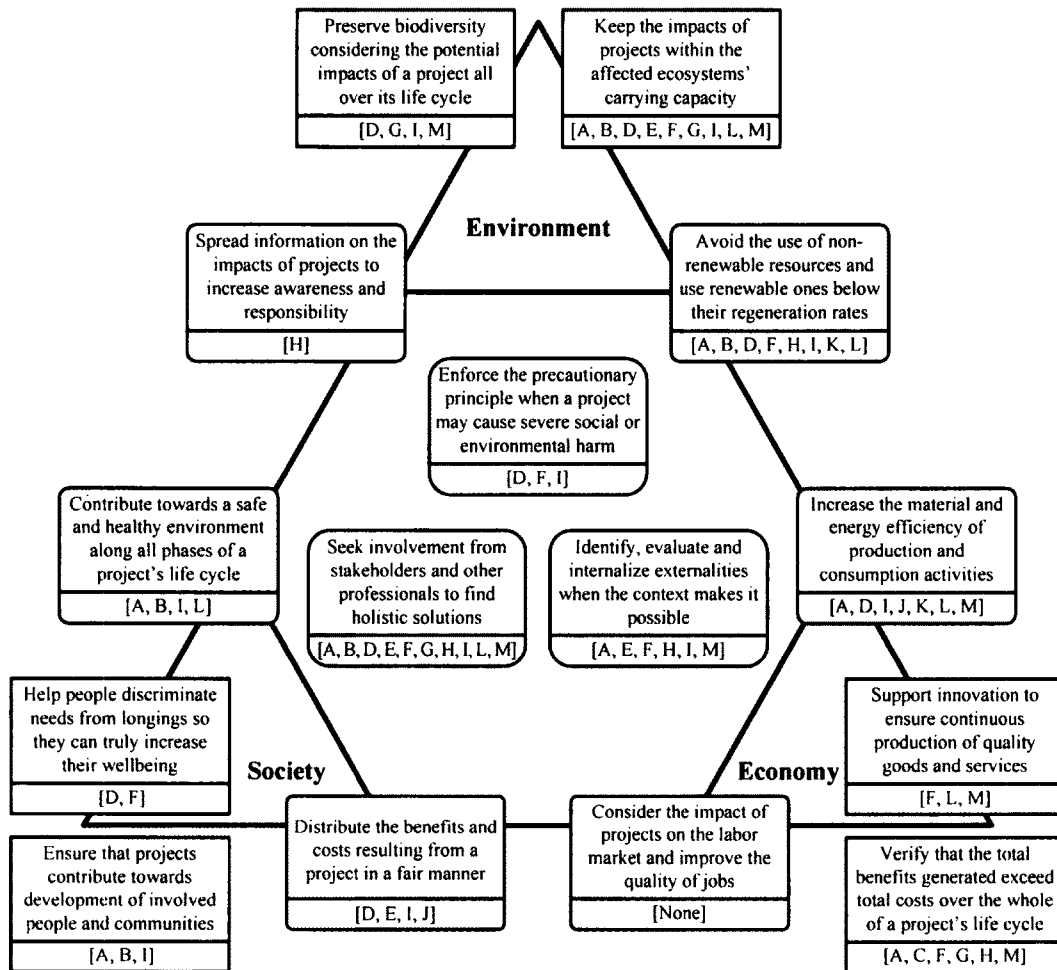


Figure 3.4 Proposed sustainability principles for engineering (letters refer to Table 3.2)

The principles in Figure 3.4 are phrased in such a way as to fit any engineering project. One practical application of the sustainable engineering principles is the development of question grids. The 15 principles in Figure 3.4 are to be included in these grids (they may be slightly adjusted) and rephrased into questions (e.g. How can stakeholders and other professionals be involved in the project if holistic solutions are sought?). The purpose of a question grid is to feed and support the engineers' thinking concerning a project's sustainability from the moment it is initiated. An example of similar question grids can be found in Fenner *et al.* [2006]. However, such grids are too general to allow for the assessment of technical solutions. The principles must thus be contextualized and broken down into a more detailed set of criteria along which design options can be compared. Ultimately, the performance of an engineering system according to each criteria has to be assessed with appropriate indicators.

Complying with all of the principles in Figure 3.4 simultaneously is obviously demanding. The context in which an engineer works will either facilitate or seriously hinder the operational value of sustainability principles. Thus, they must be considered as an ideal to achieve, in the same way as other values put forward in engineering codes of ethics. Despite their relevance, lists of principles such as the one in Figure 3.4 only show to a certain extent the wide range of interactions between technology, ecosystems, individuals and society. A more systemic approach is therefore required to improve our understanding of how society and environment are affected by, and in turn also impact, engineering projects.

3.4 Concepts and models relevant to environmental and social systems

This section presents some of the most significant concepts and models proposed in natural or social sciences that help put engineering projects into their broader context. All concepts and models presented in Table 3.3 share, to a certain degree, the view that environment and society are complex and broad systems.

Table 3.3 Concepts and models relevant to sustainable development, environment and society

	Concept or model	Description
Sustainable development	Model of economic sustainability [Ikerd, 1997]	The limits of the economic system are expanded to include not only economic, but also ecological and social forms of capital. Sustainability requires that stocks of ecological and social capital be maintained, not depleted by economic activity.
	Model of the sustainable enterprise [Anderson, 1999]	Sustainable enterprises develop on seven fronts: eliminate waste; render emissions benign; use renewable energy; close technical and natural cycles; transport people and products efficiently; sensitize stakeholders; deliver services instead of products.
	Sustainable enterprise [Parrish, 2007]	The enterprise is a system around which individual stakeholders relate and that operates in a broader socio-ecological system. Individuals, companies and the socio-ecological system have survival and purpose needs. The sustainable enterprise organizes its activities so that both types of needs are met simultaneously for stakeholders, the enterprise itself and the socio-ecological system.
Socio-environmental	Industrial ecology [Graedel and Allenby, 1995]	Interactions between the industrial and ecological metabolisms have to become benign to preserve the latter. The changes needed in industrial systems should be inspired by the dynamics observed in natural ecosystems.
	Socio-economic process [Lawn, 2004]	The economy (man-made capital) is part of the sociosphere (social capital) which in turn is part of the ecosphere (natural capital). Well-being (or psychic income, as defined by the author) depends, in different ways, on each one of these systems.
	DPSIR framework [UNEP, 2005]	<i>Driving forces</i> (be they socio-economic or socio-cultural) increase or mitigate <i>Pressures</i> (stresses put on the environment by human activities) and thereby affect the <i>State of the environment</i> . In turn, environmental degradation results in <i>Impacts</i> (upon society or ecosystems) which can trigger <i>Responses</i> enforced by society.

Table 3.3 Concepts and models relevant to sustainable development (continued)

	Concept or model	Description
Environmental	Earth's life support systems [Miller, 2005]	The biosphere is the portion of the Earth (atmosphere, hydrosphere and lithosphere) where living organisms exist and interact within ecosystems. The ecological services used by humankind (matter and water cycles, climate regulation, pollution control, etc.) rely on the sound functioning of ecosystems.
	Ecosystems and humans [Millennium Ecosystem Assessment, 2005]	Ecosystems provide various provisioning, regulating and cultural services to humankind, which are directly linked to one or many constituents of well-being (security, basic material for good life, health and social cohesion).
Economic	Development as freedom [Sen, 1999]	Development can be seen as the expansion of freedoms enjoyed by people. Every person relies on a set of <i>capabilities</i> providing them the freedom to achieve valued lifestyles. Capabilities are materialized into <i>functionings</i> (actual achievements).
	Needs-opportunity-ability model [OECD, 2002]	Individuals seek to meet their needs to maintain or improve their life standards. Their consumption opportunities are influenced by external factors (availability and accessibility of goods and services), as well as their internal capacities, or abilities (financial, temporal or physical means as well as skills).
	Macroeconomic flows [Parkin <i>et al.</i> , 2005]	In a national economy, money circulates between four types of economic agents: households, governments, corporations and foreign countries. In addition to the direct transfers operated by governments, resources are distributed to economic agents via three markets: financial, goods and services, and production factors.
Social	The political system [Easton, 1965]	Society can be perceived as a system interacting with personality, biological and ecological systems. It is composed of various subsystems (cultural, political, economic, demographic, etc.). The political system translates inputs (demands and support) from its environment into outputs (authoritative and binding decisions or actions). Complementary views about political systems are exposed in Dahl [1970].
	Society as a complex adaptive system [Buckley, 1998]	Adaptive systems can be of biological, psychological or socio-cultural nature. Society is a system because it consists of a complex network of interrelationships between multiple individuals and organizations. The current structure of society is the result of past interactions and it influences present interactions. It is also maintained, changed or elaborated upon according to these interactions.
	Social systems [Luhmann, 1998]	Social systems are made up of communications between individuals. Their function is to reduce the inherent complexity of large societies. Individuals, who themselves operate according to a psychic system, interact within small (families, organizations, etc.) or large (economic, legal, etc.) social systems.

The above concepts and models are complementary to a large extent, and we build upon them to construct the sustainability framework exposed in the next section.

3.5 General sustainability framework and its application to engineering

The conceptual framework sets the foundation of what can be considered as a systemic perspective on sustainable development and engineering. Thus, it provides support to examine physical and social systems as well as engineering projects with respect to typical characteristics

of systems [Lugan, 2005]. A system consists of a set of interactions between various elements, among which some are more closely related and emerge as sub-systems. These interrelations are relatively permanent and make systems distinguishable from their global environment, but also vary in time, which allows systems to be dynamic. A system is constantly in relation with its global environment and the former must adapt to the changes occurring in the latter.

Based on this description as well as on the references cited in Table 3.3, the most relevant characteristics of physical and social systems are included within the framework presented in Figure 3.5. All potential interactions between the numerous elements composing the framework obviously cannot be specified. Moreover, they can occur at different scale (i.e. local, regional or global). The most important ones will nevertheless be discussed, after clarifications are made on the similarities and distinctions between physical and social systems.

First, these two types of systems are similar in the sense that they share the basic characteristics mentioned previously. Second, differences exist pertaining to the nature of the elements and interrelations composing them. While elements in physical systems interact through flows of material and energy, interactions between individuals and groups engaged in social systems typically take the form of communications. In addition, elements composing physical systems and their bonds to specific systems can usually be observed materially, while the affiliation of communications occurring between individuals or organizations to social systems mainly depends on their immaterial meaning.

Physical systems are located in two overlapping spheres: the biosphere (aquatic and terrestrial ecosystems) and the anthroposphere (which encompasses the agricultural, industrial and urban systems). The expansion of systems composing the anthroposphere, in which engineering projects (Products, Infrastructures, Processes and Services or PIPS) play a significant part, increases the extent of the technical cycle (i.e. flows of synthetic substances and manufactured products containing them). It also leads to noticeable disturbances in the natural cycle (i.e. flows of biological substances and materials in ecosystems), which, in turn, can jeopardize the benefits human beings and societies derive from environmental services. Those disturbances typically occur when substances hazardous to the natural cycle escape from the technical cycle [McDonough and Braungart, 2002].

In order not to enhance the well-being of some at the expense of others, engineering projects have to maximize positive contributions to their beneficiaries while minimizing negative external impacts. Besides physical systems, engineering projects are also connected to social systems and therefore stand at the interface between both kinds of systems as shown in Figure 3.5. Individuals are given a similar place in the framework since physical and social systems both contribute towards their well-being.

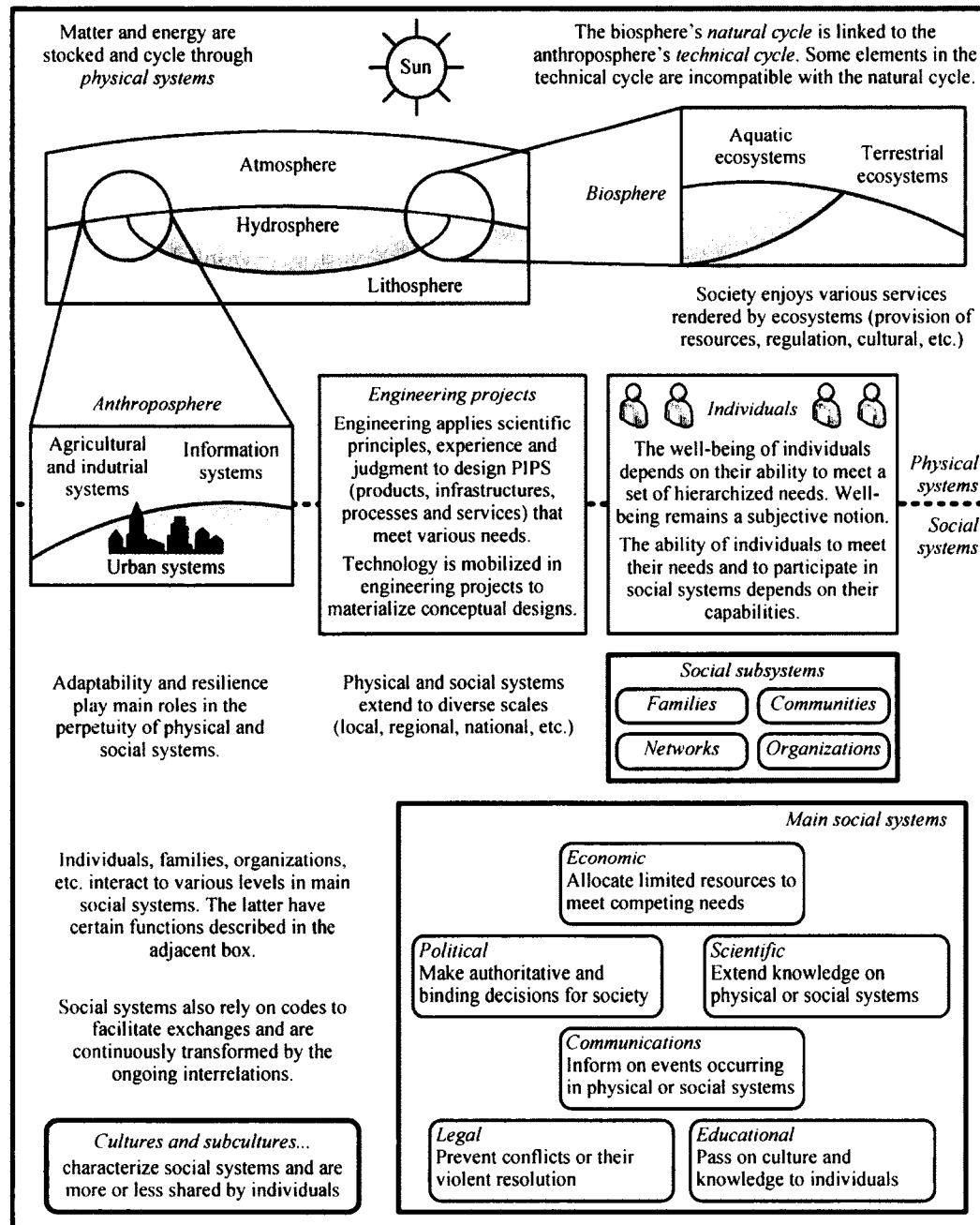


Figure 3.5 Sustainability framework for engineering

The contribution of physical and social systems to life standards is ensured by protecting or enhancing the resilience and adaptability of such systems. These characteristics are expressed in different ways for every system. For example, biodiversity is a factor impacting the ecosystems' resilience and adaptability, while democratic participation might play a similar role in political systems [Buckley, 1998]. Extending on Sen's [1999] interpretation of development, this observation also applies to individuals: their ability to operate in changing contexts and adapt depend on their capabilities. Hence, engineering projects undermining the resilience or adaptability of ecosystems, social systems or individuals might bring about benefits in the short term but are likely to have long-term negative outcomes.

As noted earlier, social systems (be they economic, political, legal, educational, scientific or communications) play a key part in meeting the needs of individuals. Conversely, the capacity of social systems to operate adequately relies on the capabilities of individuals and on the ability of social agents (i.e. families, communities, networks and organizations) to mobilize such capabilities. Social systems might structure the interactions between individuals, but ultimately, collective decisions become tangible through the actions of individuals. Therefore, engineering projects contributing towards the development of people and communities also foster sustainable development. In addition, truly sustainable projects tend to simultaneously serve the interests of individuals, organizations and societies [Parrish, 2007].

Engineering projects are generally initiated in specific social subsystems, such as public or private organizations, in order to meet various needs. Projects also mobilize other social subsystems or individuals for their realization. Since all of these agents interact in main social systems, the broader social background inevitably influences a project's outcomes. Traditionally, engineering practice has mostly been concerned with economic and legal aspects, besides obvious technical considerations. Yet, other social systems should also receive proper consideration as they significantly affect the form taken by projects. Let us now explain why this is especially the case for scientific and educational systems.

First, it is easier for engineers to deal with physical or social phenomena when there is sufficient scientific knowledge about them. Since the objects deemed worthy of scientific scrutiny are typically identified through economic and political systems, it follows that the realm of science is a social construct. This, in turn, enables society to select the research activities thought more

likely to foster its sustainable development. As a group of professionals applying science to real-world problems, engineers can play a significant role by providing feedback on the scientific knowledge needed to continue the transition towards sustainability.

Second, the complex nature of interactions occurring in physical and social systems should call for a cautious use of technology in engineering projects. Since the scientific understanding of physical and social systems is limited, human interventions almost inevitably cause unexpected indirect impacts. This is illustrated to some extent in sections 6 and 7, where interactions between a municipal wastewater system and physical or social systems are studied. Moreover, actions taken to solve a problem may worsen the situation, through unwanted retroactive effects (i.e. negative outcomes resulting from feedback loops stimulated by the initial intervention). Hence, engineering projects should not only be seen as technical challenges, but also as conveyors of social transformation, either positive or negative, acting among many other factors.

Third, engineering students rely on the educational system to acquire the necessary knowledge and skills. Hence, this system defines the toolbox engineers mobilize as professionals: the strategies for problem resolution, the spectrum of technical solutions considered, the methods of analysis used to assess and compare concepts, the approaches for project management, etc. The impact of the educational system upon engineering sustainability is thus quite significant and will be detailed later on in the discussion. Further examination of the relations existing between engineering projects and physical or social systems will first be realized by discussing the sustainability principles proposed in Figure 3.4.

3.6 Discussion on the principles for sustainable engineering

Based on the systemic perspective put forward in the sustainability framework and recent advances towards a “theory of sustainable development” [Schultz *et al.*, 2008], we now propose a systemic definition of sustainable development. Development can be considered sustainable if it allows every people globally to at least meet their basic needs, if it provides individuals in a given society equal opportunities to increase their quality of life and if it provides future generations increasing opportunities. Present and future development rests on the sound functioning of numerous physical and social systems, as well as on every individual’s capabilities. For development to be sustained, present decisions should increase the capacity to function of these components, or at least protect them from long-term irreversible damage. The relevance of the

principles proposed in Figure 3.4, as well as the connexions between them, are discussed in Table 3.4 according to this definition.

Table 3.4 Relevance of the proposed sustainable engineering principles

Principles	Discussion
1- Preserve biodiversity considering the potential impacts of a project all over its life cycle	Biodiversity is often associated with the resilience of ecosystems. Hence, the preservation of habitats which exhibit a high level of biodiversity will enhance the capacity of ecosystems to provide useful services for future generations.
2- Keep the impacts of projects within the affected ecosystems' carrying capacity	Ecosystems can only cope with a certain level of pressure or rate of change, even if this threshold is sometimes difficult to quantify. Exceeding this carrying capacity can lead to a progressive decline in the quality and quantity of the services provided by ecosystems upon which well-being depends.
3- Avoid the use of non-renewable resources and use renewable ones below their regeneration rates	Non-renewable resources are available in finite amounts. Agricultural, industrial and urban systems must be modified to eliminate dependencies on non-renewable resources which availability is declining. Renewable resources become non-renewable if their basis for regeneration is destroyed over time.
4- Increase the material and energy efficiency of production and consumption activities	With increases in global population as well as in demands from developing countries, respecting of the Earth's biocapacity in the future might only be possible if material and energy efficiency of agricultural, industrial and urban systems are drastically increased.
5- Support innovation to ensure continuous production of quality goods and services	The ability of economic systems to operate is influenced by changes occurring in other social and physical systems. Innovation generates a variety of technologies and organizational models to choose from if dominant patterns of production and consumption become inappropriate.
6- Verify that the total benefits generated exceed total costs over the whole of a project's life cycle	The present allocation of resources to projects for which long-term costs outweigh short-term benefits compromises the availability of these resources to future generations and consequently their ability to meet their needs.
7- Consider the impact of projects on the labor market and improve the quality of jobs	The well-being of individuals is affected by their working environment. Furthermore, revenues associated with labor allow people to contribute to governmental programs and to acquire various goods and services.
8- Distribute the benefits and costs resulting from a project in a fair manner	An unfair distribution of benefits or costs can lead to tensions or conflicts in society, thus undermining the capacity of social systems to contribute to well-being in general. Access to equal opportunities for future development also depends on the redistribution of current benefits.
9- Ensure that projects contribute towards development of involved people and communities	An increase in the capabilities of individuals or communities is associated with greater freedom to choose from available paths of development as well as increasing resilience to external perturbations.
10- Help people discriminate needs from longings so they can truly increase their wellbeing	An increase in the quality of life is the ultimate goal of development. If resources are allocated to activities which do not fully contribute to well-being, economic growth becomes dissociated from development and unnecessary pressures are imposed to ecosystems.
11- Contribute towards a safe and healthy environment along all phases of a project's life cycle	Environmental conditions influence current well-being of individuals as well as their health in the short or long-term future. Individuals in good health more easily preserve their capacity to meet their needs and to contribute to society.

Table 3.4 (continued)

Principles	Discussion
12- Spread information on the impacts of projects to increase awareness and responsibility	If links between current decisions and their resulting environmental impacts are understood, interventions or behavioural changes meant to preserve or rehabilitate ecosystems are more likely to be accepted and successfully applied.
13- Enforce the precautionary principle when a project may cause severe social or environmental harm	Long-term, irreversible damage done to existing physical or social systems will decrease future generations' potential for development. The use of the precautionary principle helps to identify and avoid such outcomes.
14- Identify, evaluate and internalize externalities when the context makes it possible	Decisions contributing to a fair distribution of benefits and costs and to a maximization of the benefits compared to costs are only possible if externalities are identified, evaluated and internalized.
15- Seek involvement from stakeholders and other professionals to find holistic solutions	Impacts (positive or negative) of projects on physical or social systems are so numerous and diverse that engineers can often not identify or quantify them all. Efforts made to address concerns of stakeholders can contribute to ensure projects a broader and stronger support.

All principles prove to be consistent with the systemic definition of sustainable development given, even those for which gaps in the literature were identified. Obviously, this does not prove that the proposed principles are flawless or complete. Modifications could thus be performed, if the need arises, after they become more largely applied and tested. In the short term, the emergence of a consensus around a detailed normative foundation for sustainable development would facilitate the identification of remaining weaknesses. The comparison of the structure along which sustainability principles are organized to the conceptual framework reveals a non-negligible discrepancy. While economic and social dimensions are represented as distinct entities in Figure 3.4, the economic system appears as one amongst many other social systems in Figure 3.5. Keeping in mind that the importance of economic considerations cannot be underestimated, it might be necessary to refine and detail the principles attached to the social dimension to fully take into account the variety of issues at stake.

3.7 Discussion on the use of the framework in engineering education and practice

The sustainability framework in Figure 3.5 helps identify the types of interaction between engineering projects and the physical or social systems associated with them. Since the framework proposed is general, we recommend that its elements be expanded to the desired level for every given application. That way, the connections at stake between a project and the related ecosystems, industrial sectors, main social systems or particular stakeholders are more likely to be thoroughly investigated.

The systematic examination of potential interactions is crucial to identify significant issues that require subsequent detailed analysis. As it can be difficult to distinguish what is significant from what is not, engineers should seek the support and opinion of other professionals to make informed decisions. The resulting deliberations will prepare engineers to explain and account for their choices. In the process, engineers should detect factors which may impact the project's sustainability, but for which they lack knowledge or competences. Only then will they be able to determine which professionals or stakeholders are needed in their (multidisciplinary) design team. It follows that engineering education needs to address broad issues because one cannot detect a lack of competence in a given field without basic knowledge. The discussions taking place while members of such heterogeneous teams develop a common sustainability framework should be paid attention to, since they reveal some disciplinary biases which influence the different ways they view the world. Once these differences are understood, the design team will be more capable of adopting a shared approach to sustainable development. This remark illustrates why the framework is not only of interest to engineers, but also to decision makers involved in engineering projects or technological development. The framework could be used, for example, by managers in organizations concerned with social responsibility or by policy makers implementing sustainable development strategies.

The framework also addresses a problem put forward by Lundqvist [2000]: sustainability criteria and indicators are usually chosen in an ad hoc manner. In order to be more relevant to projects under study, this choice should instead be based on a causal chain describing the relations between related economic activities, the state of the environment and social interactions. In parallel, the contribution of projects towards sustainable development can be analysed with a wide variety of tools such as life cycle assessment, impact assessment, stakeholder analysis, etc. [Gagnon and Leduc, 2006]. In order to ensure adequacy between the chosen indicators and tools, the latter should be positioned on the framework to clearly identify which systems or interactions they intend to evaluate. Finally, the framework complements the set of principles in Figure 3.4, since identified relationships can be related to corresponding principles. In order to use the framework for the described purpose, three main steps are proposed:

- Identify important relationships occurring between a project and each component of the framework (e.g. resource use with lithosphere, GHG emissions with ecosystems, etc.).
- Associate these relationships to the principles in Figure 3.4 (e.g. use of renewable resources, compatibility between emission and assimilation rates of GHG, etc.).

- Choose proper methodologies or tools to evaluate the magnitude of these relationships (e.g. life cycle assessment for resource use and GHG emissions, etc.).

As this novel approach concerns sustainability issues, it does not conflict with the realization of technical acts exclusive to engineers. Moreover, as the study of social and environmental aspects of engineering projects is multidisciplinary by nature, it seems unlikely that such acts be devoted to certain professionals. To ensure such interactions are studied thoroughly, requirements could be made more explicit in professional rules of conduct. However, the transformation of professional practice depends on engineering education, a subject for which the framework has major implications. When presented in introductory courses, it is likely to provide students with a better understanding of the entire context of engineering practice and of the purpose of engineering projects. In order to offer sufficient content, the framework should be expanded to reflect the distinctive characteristics of each field of engineering and of each geographic area. This is a key step since ecosystems, materials, sources of energy, organizations, networks and cultures, as well as interactions in social systems vary with different contexts. The framework also makes it easier for professors to justify the relevance of non-technical courses (ethics, management and economics, legal issues, environmental management, etc.) since engineers need the related aptitudes to contribute more actively towards sustainable development in the future.

Furthermore, engineering faculties can build upon the framework to identify and develop new relevant courses, or adapt existing ones, so that future engineers can learn about and later meet the challenges of sustainability. Organizations accrediting engineering programs, such as ABET and the Canadian Engineering Accreditation Board for example, now have requirements on that matter. Still, recent surveys show that most U.S. programs do not deal with sustainability issues in an integrated manner (i.e. across the curriculum and through capstone projects) [Woodruff, 2006; Allen *et al.*, 2009] as is it probably the case in most countries. Additional courses may focus, for instance, on life cycle assessment, environmental economics, sustainable design, society and technology, etc. To make a significant difference, these courses should provide students with the tools (a number of which are mentioned in Table 4.5) to more effectively manage emerging environmental or social issues [Davidson *et al.*, 2007]. While it is neither possible nor desirable to turn engineers into experts in every subject, positioning the profession in this broader sustainability framework is, in our view, essential knowledge that future engineers need to acquire. The skills and vocabulary thus developed will increase their ability to

take part in decision-making processes and to collaborate efficiently with specialists of other disciplines. Even if this discussion focuses on the formation of engineering students, these elements are also relevant for continuing education given to professional engineers.

3.8 Conclusions

Several lists of sustainable development principles already exist in the literature: some are general and others are specific to engineering. Based on the analysis of the principles reviewed, we proposed comprehensive and coherent sets structured along a novel logical structure in Figure 3.2 (general principles) and Figure 3.4 (engineering principles). We then described the various uses engineers could make of sustainable development principles lists. Nevertheless, an improved understanding of the connections between technology, ecosystems, individuals and society would complement such principles. In response to this, we present numerous concepts and models rooted in natural and social sciences in a synthesized conceptual framework (Figure 3.5). The latter exposes some of the interrelations existing between physical and social systems with a particular focus on engineering projects. We demonstrated that such projects relate to both types of systems in various and multi-faceted ways, namely by discussing principles for sustainable engineering according to a novel systemic definition of sustainable development. A glimpse of the potential uses of the sustainability framework for engineering practice was provided (e.g. define problems, set up design teams and evaluate projects). Educationally-oriented uses were also presented: it can help introduce students to the engineering career and support the adaptation of existing engineering programs to better tackle sustainability issues. While the framework is intended for engineers, its contents are relevant for decision-makers involved in engineering projects or technological development. Even though the sustainability framework exposed in this paper was elaborated in a structured manner, just a few of all conceivable interactions between engineering, society and environment could be discussed. A wider range is presented in Table 4.6 and its application to the design of a wastewater system is illustrated in chapter 7. The sustainability framework also needs to be expanded further by professional engineers or professors in their respective fields in order to meet their particular needs. Only then will it capture the entire complexity of particular situation and truly assist users in their activities. The next step towards an efficient use of the proposed sustainability framework, and the main subject of chapter 4, consists in its incorporation into the “sustainable design process”. Such a remodelled design process enables engineers to fully consider sustainability issues along all the phases of a project realization. The contents and uses of the sustainable design process will be discussed in upcoming publications.

Chapitre 4 CONCEPTION CONVENTIONNELLE ET DURABLE

Avant-propos

Titre : From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability

Auteurs et affiliations :

B. Gagnon : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

R. Leduc : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

L. Savard : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté d'administration, Département d'économie.

Date d'acceptation : 13 août 2010.

État de l'acceptation : version finale acceptée pour publication.

Revue : Journal of Engineering Design.

Référence : [Gagnon *et al.*, 2012]

Titre français : D'un processus de conception conventionnel à un processus de conception durable : les différentes teintes de l'ingénierie durable.

Contribution au document :

La première moitié de l'article (sections 4.1 à 4.3) complète la revue de littérature sur la conception conventionnelle et la conception durable, tel que décrit dans le chapitre 2. La seconde moitié (sections 4.4 à 4.7) décrit comment le processus intégré de conception durable en ingénierie (PICDI) a été développé, puis présente comment les différentes dimensions et teintes de l'ingénierie durable ont été identifiées. Une procédure pour l'évaluation des teintes est ensuite proposée et ses particularités sont discutées. La mise en évidence des dimensions de l'ingénierie durable est un des éléments originaux de la thèse. La procédure élaborée pour l'évaluation des teintes selon chacune des dimensions proposées sera au cœur de l'étude de cas décrite dans les chapitres 6 et 7.

Résumé français :

Réaligner le mode de développement actuel selon une tangente plus durable exige la contribution de tous les secteurs de la société, incluant l'ingénierie. Progresser vers la pratique durable de l'ingénierie nécessite la modification du processus de conception de manière à ce que les enjeux pertinents y soient traités adéquatement. De tels processus de conception durable (PCD) ont été proposés récemment dans la littérature. En faisant la revue des processus conventionnels et durables, cet article vise à identifier les principales différences existant entre les deux approches. La contribution des récentes théories, méthodes et techniques proposées dans le domaine de la conception à l'ingénierie durable sont également discutées. Des tâches issues des PCD existants sont combinées avec des compléments jugés cruciaux en un processus intégré de conception durable pour l'ingénierie (PICDI) original. Au lieu de présenter l'ingénierie conventionnelle et durable en opposition, cet article situe les deux paradigmes sur un continuum selon lequel un ingénieur peut se positionner et évaluer son progrès. La procédure proposée révèle des teintes de durabilité selon six dimensions : (1) la structure du processus de conception, (2) la gamme d'enjeux associés au développement durable couverts, (3) la pertinence des indicateurs considérés, (4) la précision des outils utilisés pour leur évaluation, (5) le niveau d'amélioration attendu des options analysées et (6) la prise de décision.

Abstract

The challenge of realigning the present path of development on a sustainable trajectory concerns all sectors of society, including engineering. To move towards a sustainable practice of engineering, the design process needs to be modified in order for engineers to efficiently tackle the related issues. Such "sustainable design processes" (SDPs) are proposed in the literature. By reviewing conventional and sustainable design processes, this paper aims to identify the differences between both approaches. The potential contribution of recent design theories, methods and techniques to sustainable engineering is also briefly discussed. Tasks from existing SDPs are combined with crucial complements into a novel integrated sustainable engineering design process (ISED). Instead of representing conventional and sustainable engineering as a dichotomy, this paper places both paradigms on a continuum along which the engineer can position himself and assess his progress. The proposed procedure reveals shades of sustainability along six dimensions: (1) the structure of the design process, (2) the scope of sustainability issues covered, (3) the relevance of the indicators considered, (4) the accuracy of the tools used for evaluation, (5) the potential improvements expected from the alternatives assessed and (6) decision making.

Keywords: sustainable design; prescriptive models of the design process; sustainability.

4.1 Introduction

With the publication of *Our Common Future* [World Commission on Environment and Development, 1987], sustainable development emerged as a publicly recognized and well-defined concept. The need to realign the current path of development on a sustainable trajectory was already understood more than two decades ago. Recent events and observations remind us of the magnitude and the urgency of such a change: ever rising world carbon emissions [GIEC, 2007], limited progress towards Millennium Development Goals [UN, 2010], stagnating or declining life satisfaction in OECD countries [The Conference Board of Canada, 2009], increasing number of threatened species [Vié *et al.*, 2009], etc. This challenge calls for active contributions from individuals and organizations among all sectors of activity and from various fields of knowledge. Several initiatives spurred during the last decade, simultaneously addressing environmental protection, economic development and social equity, to constitute the foundations of what can be called a “Sustainability Revolution” [Edwards, 2005].

New approaches also appeared in the field of engineering, revolving around a redefinition and reorganization of the design process to better address sustainability issues. To better understand the level of change in sustainable design processes (SDPs) proposed so far, sustainable engineering is first introduced in this paper, followed by a literature review of conventional methods as well as recent approaches in engineering design. The review also covers the documentation of design processes and the validation of design methods in order to set an adequate point of departure for the differentiation of conventional from sustainable design. Afterwards, the modifications suggested in the reviewed SDPs are discussed according to key observations emerging from the field of sustainability science. This leads to the identification of further improvements, which are combined with tasks suggested previously into an integrated sustainable engineering design process (ISED). Finally, a novel procedure allowing engineers or organizations to evaluate their progress towards a more sustainable design process is proposed and discussed.

4.2 Sustainable development and engineering

Sustainable development has originally been defined as “a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” [World Commission on Environment and Development, 1987]. Since the publication of *Our Common Future*, the concept has been the subject of numerous redefinitions and interpretations.

Disagreements on what “development” should be and on what truly is “sustainable” will probably never vanish. This can be explained by many factors, among which:

- The reference to normative concepts (e.g. what is fair? what contributes to well-being?)
- The need to consider uncertain or unknown long-term effects on complex systems.
- The difficulty to foretell the preferences of future generations (e.g. needs and values).

Moving towards a more sustainable development has boundless implications which individuals and organizations around the world are just beginning to grasp, namely because the concept is still young and covers such a large range of issues. It will likely evolve as alternative interpretations are put into practice and compared. For the time being, the operationalization of sustainable development in various sectors of activity requires to settle for an acceptable, yet incomplete and imperfect, definition or representation.

During the last two decades, many reflected on the repercussions of sustainable development for engineering education and practice. This led to the emergence of “sustainable engineering” as a field of multidisciplinary research and, more lately, as a topic relevant for professional practice. Sustainable engineering can be broadly defined as the integration of sustainability issues in the various activities associated with engineering practice. Such issues are now broadly covered in scientific literature and official publications through principles, guidelines, new approaches to design, lists of criteria and indicators, etc. An exhaustive review of general and engineering-specific principles of sustainable development presented by Gagnon *et al.* [2009] lead to the identification of a number of concurring elements listed in Figure 4.1.

According to the principles in Figure 4.1, sustainable engineering projects maximize positive contributions to the well-being of individuals and simultaneously preserve the sound functioning of ecosystems and social systems. Since characteristics of products, processes, services, buildings or infrastructures are primarily defined through the process of design, it appears necessary to address all relevant sustainability issues right from the start of a project.

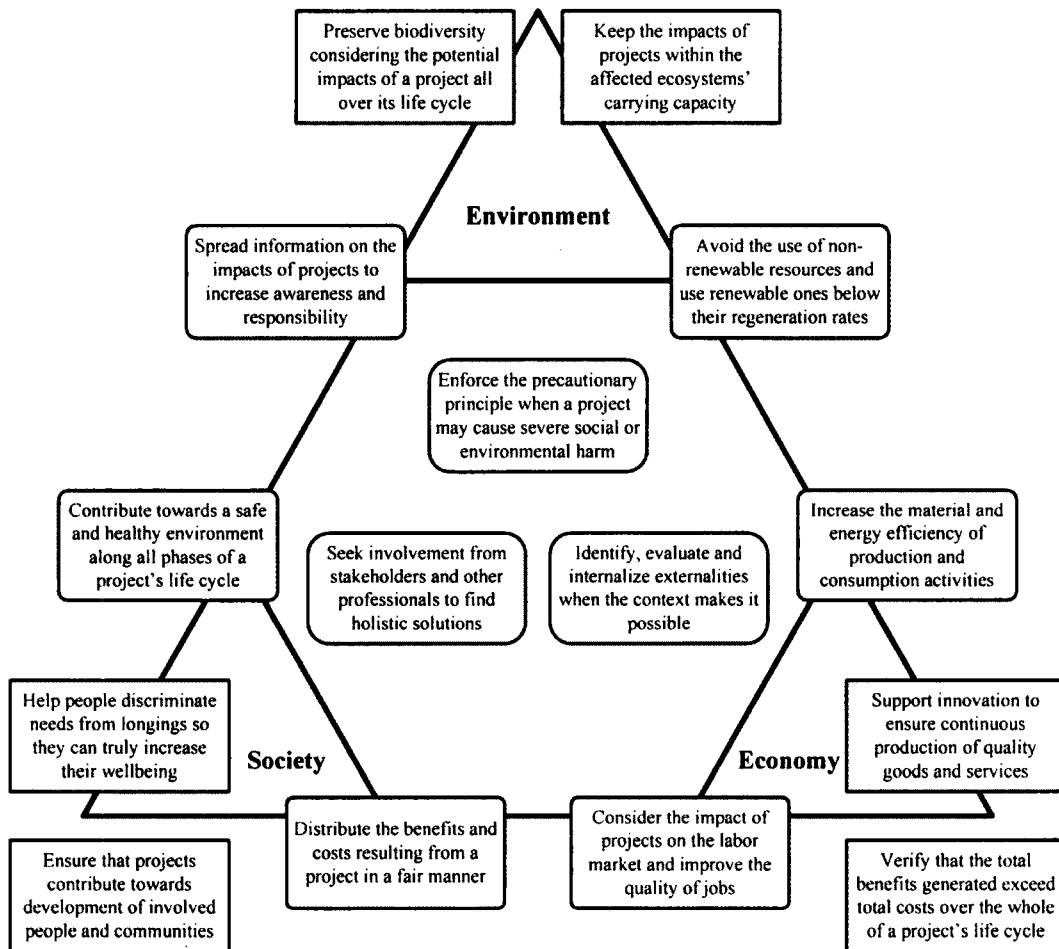


Figure 4.1 Sustainable engineering principles adapted from Gagnon *et al.* [2009]

4.3 Literature review on engineering design

Design is one among many tasks conferred to engineers such as: project and team management, operation and maintenance management, site supervision, quality control, research and development, etc. Nonetheless, it remains a central part of engineering practice as the design of specific projects is often exclusively devoted to engineers. Before discussing the elaboration and dissemination of the sustainable design process, it is necessary to define the characteristics of the conventional design process (i.e. the approach to design most representative of engineering practice at the moment).

4.3.1 Conventional design process

The stages and particularities of a variety of proposed design processes are reviewed in Table 4.1 to present a comprehensive overview of the conventional design process (CDP). All reviewed CDPs can be associated with the systematic approach to design of Pahl *et al.* [2007]. They indeed

rely on the clear definition of stages and sub-stages, each of them being characterized by specific inputs, outputs, tasks and methods. Most also emphasize the importance of functional modelling. In addition, some are influenced by axiomatic design, according which good design is guided by the successive mapping of needs into functional requirements, design parameters and process variables [Suh, 1990].

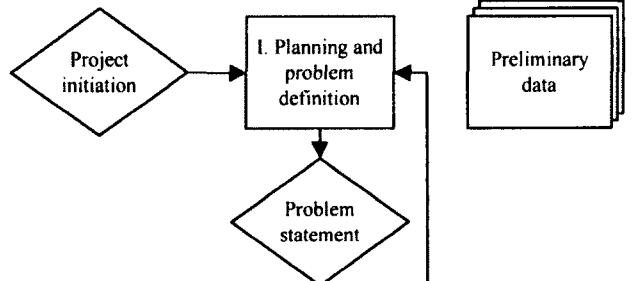
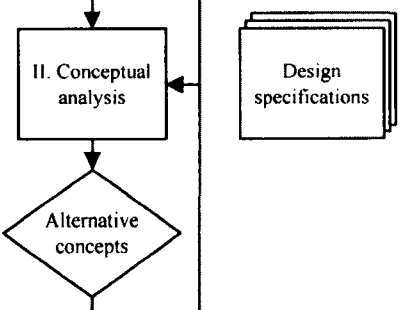
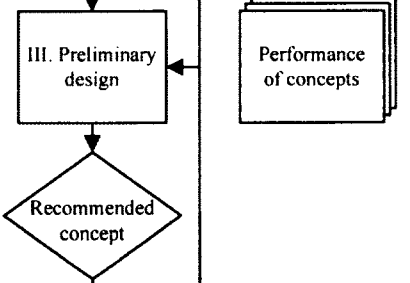
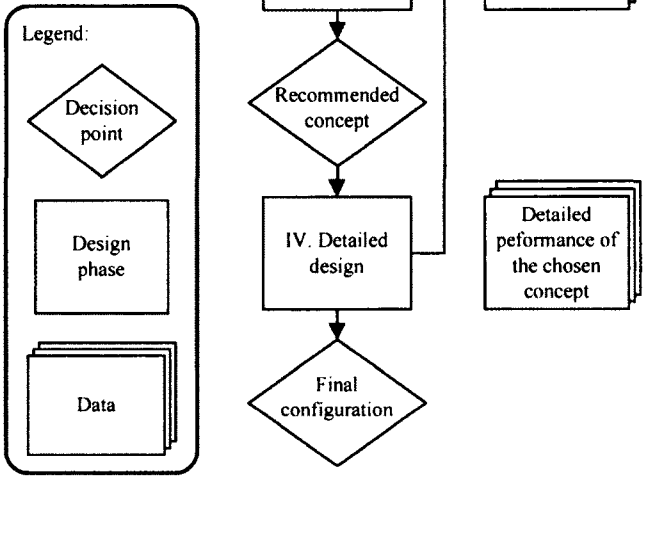
Table 4.1 Conventional design processes

Reference	Main design stages and comments
Dhillon [1996]	(1) Problem identification. (2) Problem definition. (3) Information gathering. (4) Task specifications. (5) Idea generation. (6) Conceptualization of the alternative solutions. (7) Analysis of the alternative solutions according to the design specifications to identify the optimum one. (8) Experimentation. (9) Solution presentation. (10) Production. (11) Product distribution. (12) Consumption.
Dym and Little [2000]	(1) Problem definition: clarifying objectives, identifying constraints, establishing functions. (2) Conceptual design: setting design specifications, generating alternatives. (3) Preliminary design: modelling design, testing and evaluating design. (4) Detailed design: refining and optimizing design. (5) Design communication: documenting design. Every phase has clear inputs and outputs. Feedback loops are essential.
Otto and Wood [2001]	Understand the opportunity: (1) Develop a vision; (2) Market opportunity analysis; (3) Customer need analysis; (4) Competitive analysis. Develop a concept: (5) Portfolio planning; (6) Functional modelling; (7) Product architecture development; (8) Concept engineering. Implement a concept: (9) Embodiment engineering; (10) Physical and analytical modelling; (11) Design for X; (12) Robust design.
Bouchart <i>et al.</i> [2002]	(1) Initiation of project. (2) Generation of alternatives and definition of criteria. (3) Analyses and evaluations of alternatives. (4) Final selection. The design is undertaken by one or many organizations and different stages are placed under the responsibility of different teams or individuals. The process is not sequential and incorporates feedback loops. Some stages are done explicitly while others are realized in an implicit manner.
Ordre des ingénieurs du Québec [2003]	(1) Data identification: identifying the problem, the context and the constraints. (2) Analysis: Generation and evaluation of alternatives, choice of a preferred alternative. (3) Preliminary design: elaboration and communication of the chosen alternative. (4) Detailed design: specific data gathering, detailed analysis, optimization and communication. (5) Realization: provisioning, site supervision and follow-up. (6) Operation: start-up, operation and maintenance.
Mosborg <i>et al.</i> [2005]	(1) Problem definition: clarifying the problem and identifying constraints. (2) Information gathering. (3) Solutions generation. (4) Analysis and evaluation: using tools to determine if solutions meet or exceed evaluation criteria. (5) Selection of the best solution. (6) Communication and implementation of the solution.
Mulder [2006]	(1) Analysis: identifying and clarifying the design problem, defining the design goal, defining functional and technical requirements. (2) Synthesis: generating and outlining potential solutions. (3) Simulation: model the expected behaviour of the product. (4) Evaluation: comparing simulation results with requirements. (5) Decision: confirming the validity of the solution. The design process is iterative in nature.

Note : The Ordre des ingénieurs du Québec, unlike many other engineering organizations, gives a detailed description of the design process in its guide to professional practice and was thus included in the review.

The stages defined in the CDPs of Table 4.1 show many similarities, upon which is based the generic conventional engineering design process described in Table 4.2. The accompanying diagram illustrates the iterative nature of the design process, as well as important decision points and data. The format adopted to represent the generic CDP is based on the structure elaborated by Bouchart *et al.* [2002].

Table 4.2 Generic CDP tasks

Design stage	Tasks	CDP Diagram
I-Planning and problem definition	<ol style="list-style-type: none"> 1. Team formation. 2. Definition of the problem, objectives and context. 3. Identification of constraints and other preliminary data. 4. Planning of subsequent stages. 	
II-Conceptual analysis	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identification of the functions the system must provide. 2. Generation of alternative concepts. 3. Definition of design specifications, based on the functions or mandatory requirements such as regulations. 	
III-Preliminary design	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elaboration of the alternative concepts. 2. Evaluation of the concepts, including technical performance, cost estimation, risk analysis, etc. 3. Selection of the best concept. 	
IV-Detailed design	<ol style="list-style-type: none"> 1. Detailed elaboration of the chosen alternative. 2. Further evaluation and optimization. 3. Identification of requirements for the manufacturing, construction, operation and maintenance phases. 4. Documentation and communication of the final design. 	

The most important difference existing between the CDPs reviewed consists in the inclusion or exclusion of phases following design, such as production and operation, in the design process. Undoubtedly, these phases must be considered during design and their monitoring in projects currently under way can hold valuable lessons for future projects. For clarity purposes, implementation and other subsequent phases were considered to be part of a project's life cycle, but not part of the design process itself. The complementarities between the design stages and the life cycle phases of a project are further discussed in the following sections on sustainable design. One could legitimately ask whether "textbook" design processes such as those just reviewed are actually followed in practice. A recent study by Mosborg *et al.* [2005] showed that practicing engineers generally agree with the schematic representation made of the design process, while emphasizing its iterative nature as well as the importance of communication with partners involved.

The decision mapping of real-life engineering projects, a method seldom used in design research, gave additional insight on the typical approach to decision making in CDPs [Ashley *et al.*, 2008]. The study, which focused on the water sector in the United Kingdom, showed that conventional engineering is concerned with a "relatively narrow set of economic and technical criteria, mainly related to costs, risk, environmental impact, and maintaining flexibility and build quality." In order to successfully implement the conventional design process, engineers can rely on a variety of methods such as: functional analysis, creativity techniques, quality function deployment (QFD) matrixes, experiments, computer simulations, risk analysis, cost estimation, multi-criteria analysis, etc. Various constraints must also be considered: budget, schedule, regulations, codes, patents, organizational strategies, public policies, etc.

4.3.2 Recent approaches in engineering design

While conventional design represents current or typical professional practice, new theories, methods and techniques continuously emerge from engineering design research and practice. Sustainable design, which aims to generate more sustainable engineering systems through the use of appropriate tools, is only one amongst other topics in this field. It thus appears important to identify how recent trends in engineering design relate to sustainable design.

Many *design for X* (DFX) techniques have been developed, including design for environment (DFE). They also include: design for manufacture and assembly, design for quality, design for maintainability, design for reliability, design to cost and design for cost. DFX techniques intend to

go beyond functional requirements and provide other beneficial characteristics from various points of view [Holt and Barnes, 2010]. To do so, they rely on various guidelines and/or metrics. Amongst all DFX techniques, DFE is commonly associated to sustainable design as it aims to reduce the environmental impact of products and services along their life cycle [ISO, 2002]. DFE itself can benefit from other DFX techniques such as design for disassembly, design for end-of-life and design for recycling. To some extent, design for cost or design to cost can address the economic dimension of sustainability insofar as costs are considered on a life cycle basis. While other DFX techniques do not directly relate to sustainable design, they can nevertheless contribute to adequately fulfill the clients' needs at a reasonable cost, a prerequisite shared by all products and services, including sustainable ones.

Concurrent engineering is often defined in opposition to sequential design and implies the incorporation of downstream factors, such as manufacturing, assembly, maintenance and support at the very beginning of the design project [Yassine *et al.*, 1999]. It relies on cross-functional teams as well as on the simultaneous execution of design tasks to provide shorter development time and better quality. The importance of considering all life cycle phases during design, which is inspired from concurrent engineering, has already been identified as a key element in DFE [ISO, 2002]. Collaborative design encompasses concurrent engineering and promotes the collaboration of experts or professionals from various fields in a common and shared design task [Ostergaard and Summers, 2009]. Due to its multidisciplinary nature, sustainable design is by definition collaborative design. Hence, methods from this domain related to team formation, conflict resolution and information sharing could prove to be useful in sustainable design tasks.

Robust design and *flexible design* are two distinct but complementary methods. The robust design of a system allows it to satisfy the intended needs despite external or internal variations. Flexible design rather allows a system to be easily modified during its operation in a response to changes in needs or external conditions [Saleh *et al.*, 2009]. While robust design is a mature methodology for which principles, practices and tools can be identified [Hasenkamp *et al.*, 2009], a comparable support facilitating the application of flexible design does not yet exist [Saleh *et al.*, 2009]. In a context where environmental and social changes become more sudden and are only predictable to a limited extent, it can reasonably be assumed that sustainable systems will need to be both robust and flexible with respect to various factors.

Inclusive design aims to make mainstream product or services usable by as many people as reasonably possible [i~design, 2008]. An inclusive design is adapted to the variations in capabilities observed in the population (e.g. hearing, communication, locomotion, etc.) and focuses on answering the true needs of the client by avoiding the implementation of unnecessary features. This approach relates to the social dimension of sustainable development as it contributes to the well-being of a wider range of individuals than do the conventional design of products or services.

Affordance based design is a design theory based on a relational model, hence different from the functional modelling peculiar to the systematic approach of Pahl and Beitz or the axiomatic design of Suh [Maier and Fadel, 2009]. Affordances are defined as interactions between two elements of a system and depend on the characteristics of both elements. The designer-artifact-user system, itself part of a broader socio-technical system, is proposed by Maier and Fadel to identify affordances and guide design. Four types of interactions occur within this system:

- Designers interact with targeted users to identify their needs.
- Designers define the properties of artifacts (e.g. products) in order to meet users' needs.
- Internal components of an artifact interact with each other so the latter works properly.
- Users ultimately use artifacts to meet their needs.

The distinction between behavior and affordance is crucial in this model. Behaviors occur when users actually use an artifact, while affordances characterize the potential uses of this artifact. Thus, designers specify the properties of artifacts (including all components and subsystems) and by doing so, define the range of uses they can afford. Behaviors (both positive and negative) are related to affordances, but can emerge in different ways as various users interact with artifacts. It follows that the objective of affordance-based design is to define systems that "possess certain desired affordances (including functionality) to support certain desired behaviors, but that do not possess certain undesired affordances in order to avoid certain undesired behaviors" [Maier and Fadel, 2009]. Since sustainable design is concerned with the potential interactions occurring between technological solutions and ecosystems or social systems, affordance based design appears to be more compatible with such a perspective than previous design theories.

C-K design theory also aims to go beyond the functional approach. It relies on a model covering the generation of new options, in addition to the dynamic mapping between target specifications and potential options which is already covered by existing theories [Hatchuel and Weil, 2009]. For this purpose, design is represented as a simultaneous expansion of the space of concepts (C) and the space of knowledge (K) through a continuous interplay between both. Hence, a design project relies on the generation of new knowledge to validate partially unknown concepts, to generate new concepts or to revise the objectives of the project itself. Considering the multitude of environmental, social and economic considerations associated with sustainable design, insight can surely be gained by paying attention to the expansion of the knowledge space outside the conventional realm of engineering. For example, does such an expansion process lead to the reconfiguration of engineering systems and if so, by which mechanism?

Potential relations with sustainable design were identified for each of the emerging approach reviewed. Some of them, such as DFE, even prove to have a direct and obvious contribution to sustainable design. While sustainable design implies the consideration of a wide range of seemingly unusual issues for engineering projects, it fundamentally remains a design activity and shares the logical framework specific to this kind of problem-solving. Depending on the nature of projects, sustainable design is likely to benefit from the integration of relevant approaches from the field of engineering design, just as it relies on the adaptation of methods originating from other disciplines.

4.3.3 Sustainable design process

Mulder [2006] phrased how sustainable design deeply contrasts with conventional one: “[...] sustainability is not an add-on criterion. It is about all characteristics that a design should meet.” Sustainability issues must thus be considered by engineers during all design stages of a project through well integrated complements to the conventional approach. This includes, but is not limited to, the consideration of a whole range of criteria to assess the environmental, social and economic performance of potential solutions.

Many SDPs have been proposed in recent years and the following tables highlight the main modifications proposed to transform the conventional design process into a sustainable one. The SDPs in Table 4.3 were developed exclusively for engineering design, while those in Table 4.4 concern decision making for a wider range of applications.

Table 4.3 Sustainable engineering design processes (letters refer to Table 4.7)

Reference	Proposed modifications to the conventional design process
[A] Byggeth [2001]	The method for sustainable product development (MSPD) is based on two central components of the Natural Step framework: the four principles for sustainability (or system conditions) and backcasting (or ABCD-analysis). At each phase of the design process (investigation of need, product principles, primary product, production preparation and launch) conventional tasks are complemented with a sustainability product analysis (SPA). SPA modules are constituted of structured questions detailing the aforementioned principles. Solutions carried on to the subsequent stages are selected along a prioritization matrix in order to fit in a long-term strategy towards sustainability while being economically realistic.
[B] ISO [2002]	The ISO 14062 technical report describes how to integrate environmental aspects into product design and development. Fundamental issues include the adoption of life cycle thinking and the use of a multi-criteria approach to handle compromise between various environmental, economic, social or technical issues. Additions to the design process mainly concern planning (definition of environmental requirements and evaluation of a reference product), preliminary design (environmental assessment of potential solutions, then comparison with targets and reference product) and product launch (environmental communication).
[C] Lu and Gu [2003]	Sustainable product development simultaneously considers functional, environmental and economic requirements. These are respectively evaluated through life cycle quality (LCQ), life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC). Assessments are performed on a process level and results are aggregated along four life cycle phases: extraction, production, operation and retirement. Alternative solutions are finally compared according to their respective profiles.
[D] Crul and Diehl [2010]	Design for sustainability (D4S) considers a number of issues linked to people, planet and profit. Modifications are suggested along all design stages and include: (1) choosing team members with various expertises; (2) defining goals and objectives through the analysis of drivers related to the three pillars of sustainability; (3) assessing the life cycle impact of a reference product; (4) selecting strategies to guide idea generation; (5) assessing solutions according to environmental, social and economic criteria; (6) sustainability communication; and (7) sustainability performance monitoring after product launch.
[E] Ashley <i>et al.</i> [2008]	The framework for sustainable decision support is one of the main outcomes of the Sustainable water industry asset resource decisions (SWARD) project. The SWARD SDP emphasizes the selection of appropriate sustainability criteria and indicators from four categories: economic, environmental, social and technical. Other key elements comprise: (1) collection of data with appropriate tools for all sustainability dimensions; (2) selection of the preferred option with multi-criteria assessment; and (3) post-project monitoring with relevant criteria and indicators.

The terms principles, issues, criteria and indicators are mentioned in a majority of SDPs, without having exactly the same meaning from one reference to another. To ensure clarity, these terms are defined as follow, based on their typical use in the sustainability literature:

- *Principles* are fundamental propositions which ensue from core values of sustainable development and serve to guide actions or conduct.
- *Issues* are aspects or characteristics of a given activity relating to one or many principles of sustainable development.

- *Criteria* are dimensions along which alternatives can be classified or ordered to facilitate assessment or decision making.
- *Indicators* are measurable parameters, quantitative or qualitative, serving to assess the performance of alternatives along their associated criteria.

Table 4.4 General approaches to sustainable decision-making (letters refer to Table 4.7)

Reference	Proposed modifications to the conventional design process
[F] Weaver <i>et al.</i> [2000]	Backcasting is central to the SDP defined by the Dutch Sustainable technology development programme. Backcasting consists in (1) a strategic problem definition outlining current or future unsustainability associated with actual technologies; (2) defining a vision of how the needs under study could be met sustainably in the long-term future (50 years from now), based on sustainability principles; (3) working backward from the future vision to the present in order to elaborate potential solution pathways; and (4) evaluating the different options to choose among them. Sustainable solutions should, among other criteria, achieve a factor-10 to factor-50 ecological footprint reduction, on a life cycle basis, when compared to current solutions.
[G] Azapagic and Perdan [2005a]	Authors propose an integrated sustainability decision-support framework structured along three general stages: problem structuring, analysis and resolution. The identification and involvement of stakeholders is the first and most important step as they play a significant role in all subsequent steps. Other important complements to problem structuring include the identification of key sustainability issues and indicators, as well as the choice of a multiple criteria decision analysis (MCDA) method. Problem analysis mainly consists in the evaluation of alternatives and their comparison with the chosen MCDA method. Finally, the most sustainable alternative is chosen and implemented during the problem resolution phase.
[H] Boyko [2009]	The sustainable urban design decision-making process, developed in the VivaCity2020 Project, improves the conventional design process by integrating “sustainability tasks” and “sustainability reviews” along all design stages. Main sustainability tasks consist in: (1) identifying and prioritizing of sustainability issues constituting a “sustainability agenda”; (2) developing sustainability advice on preliminary designs using relevant tools and highlighting tradeoffs between sustainability issues; (3) assessing the performance of the design against the sustainability agenda; (4) developing a strategy for sustainability monitoring. Sustainability reviews are checkpoints between stages to ensure sustainability tasks are conducted in a satisfying manner.

Reviewed SDPs all prescribe the use of appropriate criteria or indicators and sometimes propose generic lists. Sustainability assessment frameworks elaborated recently for various engineering applications usually contain 10 or more criteria or indicators (not counting technical criteria or specifications) as shown by the numbers in brackets: Ashley *et al.* [2004] (13); FIDIC [2004] (45); Palme *et al.* [2005] (12); Sahely *et al.* [2005] (14); Hung *et al.* [2007] (11); Feyzioglu *et al.* [2008] (7); Khan [2008] (16); and Dihn *et al.* [2009] (10). This can complicate the process of decision making, which is a sensible aspect of design even when sustainability issues are not considered [Holt and Barnes, 2010].

In order to simplify assessment and decision making, Azapagic and Perdan [2005a] indicate that most multiple criteria decision analysis (MCDA) studies recommend that a maximum of 10 criteria be considered. Like all lists of sustainability indicators, those guiding design should also have the following characteristics: value relevance, understandability, measurability, non-redundancy, judgemental independence, balance between completeness and conciseness, and operationality [Azapagic and Perdan, 2005a].

As mentioned previously for DFE, reviewed SDPs also stress the importance of life cycle thinking, which main objectives are [UNEP, 2007] “to reduce a product’s resource use and emissions to the environment as well as improve its socio-economic performance throughout its life cycle, [from cradle to grave].” Finally, most reviewed SDPs emphasize the importance of using appropriate tools, especially for the analysis of potential solutions and the synthesis of the data gathered. Sustainability tools relevant for engineering design are cited in the reviewed SDPs, as well as other sources [Robèrt *et al.*, 2002; Ness *et al.*, 2007; Coley and Lemon, 2009], and are listed in Table 4.5. Key heterodox thinking tools emerging in the field of sustainability, which often receive less attention than analysis and synthesis tools, are also mentioned. While conventional creativity techniques can contribute to think “outside the box” and generate sustainable solutions, other heterodox thinking tools presented in Table 4.5 are assumed to provide a higher level of guidance since they are based on sustainability principles. The role of these tools in the design process will be discussed in the next sections.

Note that stakeholder participation is not present in Table 4.5 because it encompasses all categories. Depending on the strategies adopted for participation, stakeholders can be involved to a more or less extensive level in creativity, analysis and synthesis activities.

Sustainable projects need to be as technically sound as conventional projects. Sustainability tools must thus be used in conjunction with existing approaches associated with state-of-the-art engineering practice and can benefit from emerging theories, methods and techniques reviewed in section 4.3.2.

Table 4.5 Tools for sustainable design processes

Heterodox thinking	Analysis	Synthesis
Backcasting	<i>Environmental</i>	Multi-criteria decision aid methods [Azapagic and Perdan, 2005b]:
Biomimicry	Ecological footprinting	
DFE strategies	Emergy ^a or exergy ^b analysis	<i>Elementary</i>
Ecological engineering	Environmental impact assessment	Disjunctive and conjunctive methods
Factor X engineering	Environmental life cycle assessment	Lexicographic method
Industrial ecology	Strategic environmental assessment	Maximin method
Product-service systems		
Whole system design	<i>Economic</i>	
	Cost-benefit analysis	
<i>Creativity techniques</i>	Economic impact analysis	<i>Value and utility based</i>
Brainstorming	Environmental valuation	Weighted sum
Brainwriting	Inequality and equity analysis	AHP (Analytic hierarchy procedure)
SCAMPER	Life cycle costing	SMART (Simple multi-attribute rating technique)
Synectics		TOPSIS (Technique for order by similarity to ideal situation)
Morphological analysis	<i>Social</i>	
Forced connexions	Social impact assessment	
	Social life cycle assessment	
	<i>Multidimensional</i>	<i>Outranking</i>
	Generic criteria or indicators lists	ELECTRE
	Integrated impact assessment	PROMETHEE
	Question grids	

Notes:

^aEmergy or embodied energy [Odum, 1996] "is the available energy [...] used up directly and indirectly to make a service of product."

^bExergy [Szargut, 2005] "expresses the amount of mechanical work necessary to produce a material in its specified state from components common in the natural environment [...]."

4.3.4 Documentation of design processes and validation of design methods

Considering the multitude of design theories, methods and techniques proposed, it becomes relevant to validate if their application contributes to meet predefined objectives such as higher quality, reduced time to market or better profitability. Of course, the evaluation or validation of design methods, be they related to sustainable design or not, requires that their use be appropriately documented.

The documentation of processes taking place in organizations, including the design process, is well covered by the ISO 9001 quality management standard. This standard establishes many requirements, concerning for example [ISO, 2008]:

- The planning of the design process, including the definition of the stages to be followed.
- The identification of inputs, outputs and processes relative to each design stage.
- The realization of reviews at suitable stages, including the verification that planned activities were performed and that the proposed design is expected to meet requirements.

- The validation that the product meets the requirements for the intended application.
- The documentation of the tasks accomplished through the use of records.

In the situation where the design process is not defined a priori, it can be documented based on real-life projects or design problems solved in a controlled environment. Bouchart *et al.* [2002] propose a decision mapping technique in which the different stages of design are characterised with data collected through observation of meetings, focus group sessions, interviews and audits of past decisions. For a similar purpose, Coley *et al.* [2007] review a range of techniques originating from cognitive psychology such as: protocol analysis coupled with concurrent or retrospective verbalization, observation of sketching behaviour, ethnography and the diary method.

The validation of a proposed design, as defined in the ISO 9001 standard, is quite different from the validation of a design method itself. While the validation of given product requires some form of testing or modelling to see if it meets predefined requirements, the validation of a design method implies that one can demonstrate its direct contribution to specific outcomes in several sample projects or simulations. The latter task is obviously more difficult than the former because the application of design methods can be influenced by a wide range of factors, namely the rigor with which it is implemented and the designer's judgement [Frey, 2006].

A framework to evaluate theories of professional practice, also named theories of action, was put forward by Argyris and Schön [1992]. Although the framework is general enough to cover a wide range of professional contexts including engineering practice, authors did not apply it to this particular setting. According to Argyris and Schön, the evaluation process should focus on five distinct but interrelated criteria. Internal consistency: the achievement of a particular objective through a theory of action must not compromise the simultaneous achievement of other important objectives.

- Congruence: the behaviours resulting from the theory-in-use must be compatible with the espoused theory of an actor (e.g. principles the actor claims to be guiding his action).
- Effectiveness: the theory of action must allow the achievement of objectives on the long-run.
- Testability: the situation under which a theory of action can be applied must be specified, as well as the tasks involved and the desired results.

- Value: the world created by the repeated use of a theory of action by an actor must ultimately be of value to him.

A procedure called the “validation square” specifically developed for design methods was proposed by Pedersen *et al.* [2000]. It includes four quadrants, respectively related to the:

- Theoretical structure (each individual construct in the method is valid and all constructs are integrated in a consistent manner).
- Empirical structure (the example problems chosen to validate the method are representative of its intended application).
- Empirical performance (the method achieves its intended purpose in example problems).
- Theoretical performance (the usefulness observed in example problems is linked to the application of the method and can be generalized beyond those example problems).

While frameworks exhibit differences in structure and purpose, both emphasize the importance of consistency and effectiveness. As detailed in section 4.5, the procedure devised to allow the differentiation of sustainable design from conventional design is partly inspired from these frameworks. Before this procedure is presented, section 4.4 will first detail how an integrated perspective on sustainable design can be synthesized from the literature reviewed so far.

4.4 Elaboration of an integrated sustainable design process

The ISEDP builds upon the SDPs in Tables 4.3 and 4.4, but also incorporates additional modifications derived from three key issues emerging from the field of sustainability science. Firstly, Lundqvist [2000] pointed out that sustainability criteria and indicators are most of the time chosen in an ad hoc manner, while their selection should instead be based on a causal chain describing the relations between a given project, the related economic activities, the state of the environment and social interactions. The sustainability conceptual framework in Gagnon *et al.* [2009], presented as a condensed form in Figure 4.2, was developed to support design teams in the identification of the numerous potential interrelations existing between an engineering project, the environment, individuals as well as the economy and other social systems. These interactions take place at the periphery of the designer-artifact-user system defined in affordance based design.

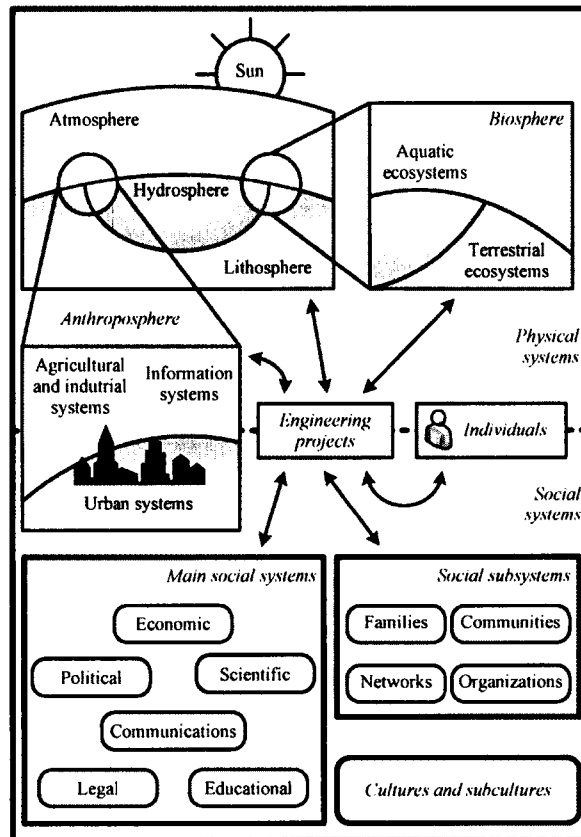


Figure 4.2 Sustainability conceptual framework adapted from Gagnon *et al.* [2009]

All potential interactions between a project and its global environment cannot be characterized during design because of time and resource constraints. Hence, the conceptual framework (in conjunction with experience from previous projects, scientific and technical literature, as well as stakeholder consultation) can help discern the most important interactions and expose their choice in a transparent manner. The relationships selected will, in turn, be assessed by the design team using appropriate criteria and analysis tools. An overview of potential relationships existing between an engineering project and its global environment is given in Table 4.6. The list of relationships given is neither exhaustive nor complete. It is rather provided to illustrate the nature of the interactions between projects and the main components of the conceptual framework.

The main benefit resulting from the use of a detailed sustainability conceptual framework is the identification of potential relationships in a more exhaustive manner, when compared to a simpler categorization of issues along the typical economic, environmental and social dimensions.

Table 4.6 Typical relationships between engineering projects and their global environment

Framework component	Typical relationships
Atmosphere, hydrosphere and lithosphere	Extraction of abiotic resources. Emission of pollutants to air, water and soil.
Aquatic and terrestrial ecosystems	Extraction of biotic resources. Physical intervention leading to habitat destruction and biodiversity loss. Effects of ecotoxic pollutants on organisms.
Individuals	Increase in quality of life for consumers or users. Job opportunities and related working conditions. Contribution to professional or skills development.
Agricultural and industrial systems	Selection of materials, fuels, components, processes, equipments, etc. among those available in function of their respective characteristics.
Urban and information systems	Compatibility with current configurations of urban systems (infrastructure, land use, etc.) or information systems (type and availability of data acquired).
Economic system	Availability of resources (labour, materials, etc.) and their relative costs.
Political system	Contribution to plans setting particular targets and eligibility to programs providing fiscal advantages or subsidies.
Scientific system	Validation through research projects proving the feasibility of technologies and setting the grounds for their use in engineering projects.
Communications system	Capacity to reach potential stakeholders and interest of stakeholders towards the information relating to the project. Type of coverage done by media and their influence on the perceptions of individuals.
Legal system	Respect of regulations, codes, standards, etc. and interactions with organizations responsible for their enforcement.
Educational system	Competences of engineering and other professionals involved in the project.
Families, communities, networks and organizations	Acceptability of a project in a given group and evolution of positions following debates or exchanges.
Cultures and subcultures	Compatibility with the current way of living and dominant values or traditions. Capacity to mobilize people eager for change which share a progressive subculture or ability to convince people resistant to change which share a conservative subculture.

Secondly, the magnitude of change which will affect environmental and social systems during the next decades is only predictable to a limited extent. This is illustrated by the wide range of socio-economic scenarios generated by the Intergovernmental Panel on Climate Change [Nakicenovic and Swart, 2000] and the Global Environment Outlook team [Rothman *et al.*, 2007], respectively for the 2000-2100 and 2000-2050 periods. Sustainable solutions thus need to be robust, in order to be implemented under a large array of circumstances, as well as flexible, so that required modifications can easily be performed. Hence, the assessment of alternative concepts in sustainable design must consider broad scenarios which reflect potential changes in environmental systems (e.g. effects of climate change on temperature or precipitations), society (e.g. adoption of new regulations or demographic changes), economy (e.g. prices of raw materials, goods and services) and individuals (e.g. changes in behaviour, attitudes or welfare). Following the precautionary principle, the implementation of solutions for which negative consequences are unpredictable under plausible scenarios should be avoided.

Thirdly, solutions that meet the ambitious challenges imposed by sustainability are likely to be radically different from conventional solutions. The required levels of increase in efficiency or decrease in environmental impact from truly sustainable engineering projects are expected to be very high, when compared to conventional projects [Weaver *et al.*, 2000]. For example, the European Commission [2009] calls for an 80% to 95% decrease in greenhouse gases (GHG) emissions for industrialized countries in 2050 when compared to 1990 levels. In a similar order of magnitude, Schmidt-Bleek [1994] proposed a factor 10 decrease in material inputs per unit of service (MIPS) for western style economies. Moreover, private and public firms now face a whole new realm of demands from multiple stakeholders associated with corporate social responsibility (CSR) (e.g. human rights, labour practices, community involvement and development) [ISO 2010]. While existing SDPs focus on analysis and synthesis tools, it is also necessary to increase the importance of creativity tools, mostly because incremental innovation is unlikely to provide the level of performance expected from sustainable solutions. For instance, Crul and Diehl [2010] estimate the eco-efficiency improvements associated with incremental innovation to be limited to a factor 2 to 4, while radical innovation is expected to provide factor 10 to 20 gains.

Table 4.7 presents the modifications deemed necessary to move from conventional towards sustainable design. Main tasks proposed in existing SDPs (Tables 4.3 and 4.4) were first identified and adapted, as shown by the letters in brackets. This analysis resulted in the definition of 14 tasks, which are mentioned in at least two reviewed SDPs and are consistent with the structure of the generic CDP in Table 4.2. In a second step, eight other tasks were derived to address the emerging issues in the field of sustainability discussed previously in this section. These complementary tasks are identified with an asterisk. Of the 22 tasks in Table 4.7, 12 are in bold because they are identified as critical to achieve completeness of any design process dealing with sustainability. Ten of these tasks were inspired from existing SDPs, considering they were mentioned in at least three sources and thus showed a high level of consensus. Two of the new tasks described in Table 4.7 are also considered critical complements. Their choice is based on their strong relationship with the emerging issues discussed, as well as their compatibility with the nine key tasks inspired from existing SDPs.

Considering the complementary tasks listed in Table 4.2, sustainable design is expected to be more resource intensive than conventional design. However, in the situation where

organizational strategy or demands from stakeholders (including clients) require that sustainability issues be addressed, it will likely prove more efficient to do so at the beginning of design rather than later during detailed design or operation. Such an approach is coherent with the early integration of manufacturing or assembly considerations in concurrent engineering or environmental considerations in DFE.

Table 4.7 Integrated sustainable engineering design process (letters refer to Tables 3 and 4)

Design stage	Tasks selected from reviewed SDPs and complementary tasks proposed
I-Planning and problem definition	1- Form a multidisciplinary design team [B,D,E,H] 2- Define sustainability principles [A,B,F] 3- Define a sustainability conceptual framework* 4- Identify sustainability issues associated with the defined problem [A,B,D,F,G,H] 5- Identify the relationships between the project and the elements in the conceptual framework* 6- Analyze stakeholders and plan stakeholder involvement [G,H]
II-Conceptual analysis	7- Define sustainability criteria in line with the sustainability issues previously identified, in parallel with technical functions [B,C,D,E,H] 8- Confirm the comprehensiveness of the sustainability criteria with the conceptual framework* 9- Develop a vision for the future in which functions are fulfilled respecting the sustainability principles [A,F] 10- Generate at least one alternative concept radically different from conventional ones using sustainability creativity tools* 11- Define broad scenarios in which the alternative concepts are likely to evolve* 12- Define sustainability indicators derived from the issues or criteria, in parallel with technical specifications derived from functions [C,E,G] 13- Identify the analysis tools with which data will be generated for each of indicators* 14- Define the approach to multi-criteria decision [B,E,G]
III-Preliminary design	15- Assess the performance of alternative concepts according to the sustainability criteria or indicators [A,D,E,F,G,H], including one "benchmark alternative" representative of current practice [B,D] 16- Validate the multi-criteria decision approach chosen and use it to recommend a preferred concept [B,E,G] 17- Validate the performance of the alternative concepts under the scenarios identified*
IV-Detailed design	18- Refine the assessment of the preferred concept [D,C,F] 19- Optimize its performance along sustainability criteria or indicators [D,C] 20- Maximize the robustness and flexibility of the preferred concept under scenarios identified* 21- Communicate recommendations for the manufacturing, construction, use and end of life phases [B,D,H] 22- Generate the set of sustainability indicators for monitoring [D,E,H]

Note: The letters in brackets refer to Tables 3 and 4 for a task inspired from existing SDPs. An asterisk refers to a complementary task. Critical tasks are in bold.

Furthermore, engineering organizations around the world gradually take position on the importance of sustainable development by changing their code of ethics or by proposing guidelines. Its consideration then not only depends on the preferences of clients or strategic

imperatives, it also engages, to some extent, the professional responsibility of engineers. Hence, they might shortly be asked to provide justification on how and how well sustainability issues were considered in projects, like it is the case for safety issues or environmental impacts at the moment. While the engineer remains a key actor for the implementation of the ISEDP, its multidisciplinary nature calls for collaboration with other professionals.

As for any design method or technique, sustainable design must be implemented in a way coherent with the nature of projects and the availability of resources. The dimensions and shades of sustainability, discussed in section 4.5, are precisely developed to support the use of the ISEDP (or other SDPs) in a flexible and gradual manner. The ISEDP does not include in its structure a precise interpretation of sustainable development or a detailed analysis of the implications the concept has for engineering. It is thus flexible enough to adapt to future interpretations of the concept as well as projects diverse in nature. However, it remains crucial that the design team clearly state its views on sustainable development and the reference framework upon which this interpretation is based right from the start of a project (tasks 1 to 5). This step is particularly important because it influences all following tasks in the ISEDP and it makes it easier for everyone involved to understand the foundations upon which design project lies.

Due to the importance of life cycle thinking for sustainable design, the stages of the ISEDP are positioned according to the life cycle phases of a project in Figure 4.3. Every project is part of an organizational background consisting of design processes undertaken previously or subsequently. It is also part of a technological background, made of the life cycles of components necessary for the project at stake or more complex assemblies in which this project serves.

Many interactions exist between the project at the foreground and its organizational or technological background. For example:

- Life cycle assessments done in previous projects inside a given enterprise or consulting firm can serve as benchmarks for a current project.
- Solutions implemented in prior projects similar to the one being realized are familiar to the design team and are more likely to be among the considered alternatives.
- The influence components provided by external partners have on a project's life cycle is more easily taken into account if their own life cycle attributes are known.
- The expertise in life cycle assessment in an organization increases with a more widespread application of the tool.

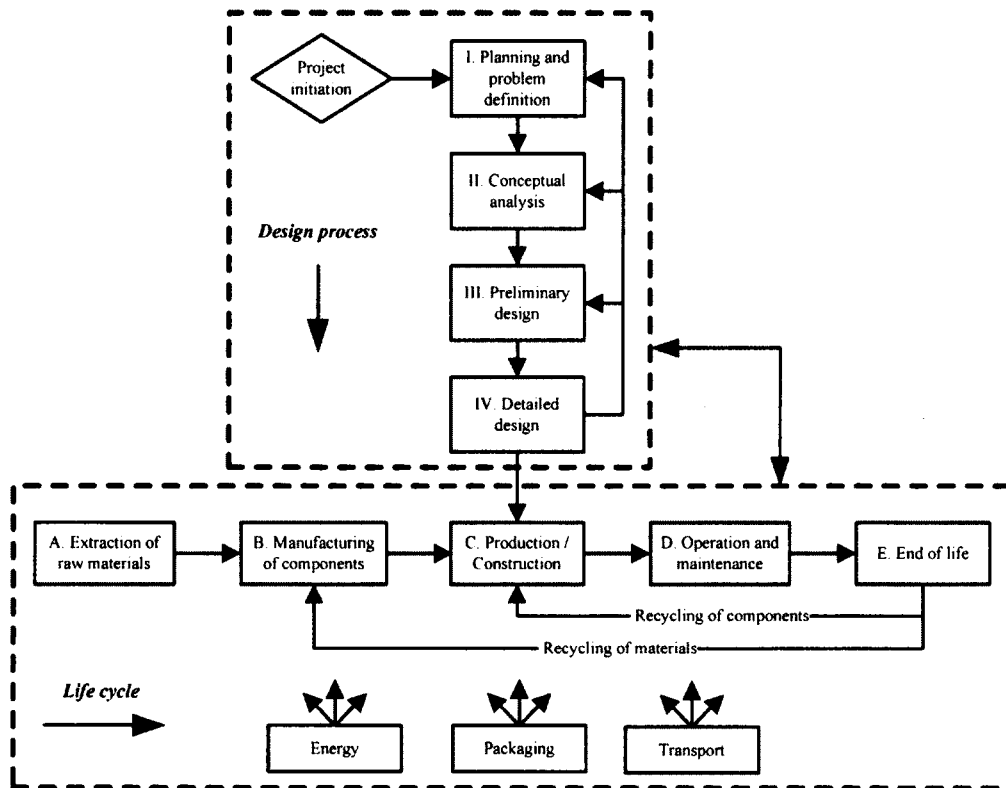


Figure 4.3 Design stages and life cycle phases, inspired from Brent [2005]

Decision making is a delicate matter in all design processes, be they conventional or sustainable. As mentioned in section 4.3.3, the consideration of a great variety of sustainability issues, in complement with conventional technical issues, poses a problem due to the potentially large number of associated criteria. To address this problem, criteria can be considered in a sequential manner, reducing the number of them to be treated simultaneously. In order for the potentially large number of sustainability indicators and technical specifications to be considered in an optimal and transparent manner, we propose in Table 4.8 four categories in which most criteria can be classified. This classification builds on decision rules proposed in existing MCDA methods [Azapagic and Perdan, 2005b] as well as common approaches to sustainable design (e.g. LEED certification) [USGBC, 2005].

The classification of criteria during the design process according to the categories described in Table 4.8 has four main advantages:

- Instead of choosing a single MCDA method to handle all potential criteria, they can be considered at different design stages in the way that appears most effective.

- The assessment of criteria is usually more precise, and thus more demanding, as we move from the first category to the fourth. Nevertheless, all types of criteria can serve to improve the considered alternatives or influence decision-making. Hence, the use of these categories makes it easier to recognize all criteria guiding design, even the ones not integrated in a weighted MCDA method.
- The structure of the decision-making process can be more clearly presented.
- The extent of the efforts made to move towards sustainable design is more easily evaluated.

Table 4.8 Categories of criteria considered in the ISEDP

Category	Purpose	Description
Mandatory, non-discriminating	Screening of concepts (conventional design)	These criteria are associated with regulations, codes, standards, etc. and relate to various dimensions of sustainability (environmental standards, health and safety requirements, regional labour and materials, etc.) or technical issues. The respect of such criteria is mandatory in conventional as well as in sustainable design, so they cannot serve to discriminate the former from the latter.
Relative, non-discriminating	Improvement of concepts	This category of criteria guides the improvement of a given concept and serves to assess, in a qualitative or quantitative manner, the relative improvement realized compared to an initial configuration. These criteria thus help making each alternative concept more sustainable, but do not allow comparison between the concepts.
Threshold, discriminating	Screening of concepts	Threshold criteria set objectives (more demanding than mandatory requirements) that concepts need to respect in order to be considered acceptable (go/no-go testing). Concepts which meet the criteria can pass on to subsequent design stages (go) and are discriminated from those who cannot (no-go).
Weighted, discriminating	Identification of an optimal concept	These criteria are considered in a single decision step, with the help of one of the many weighted MCDA methods available (Table 5). A preferred concept outperforming others is identified, the outcome depending on the criteria considered and the decision rules particular to the chosen MCDA method.

In the next section, we present how the use of these different types of criteria, in conjunction with variations along five other dimensions, makes it possible to differentiate shades of sustainability existing in engineering design.

4.5 Shades of sustainability for engineering design

Sustainable design is often described in opposition to conventional design. The integration of relevant sustainability issues, the use of sustainability assessment tools and the consideration of a range of sustainability criteria for decision-making should allow an engineer to implement sustainable design and thus choose the most sustainable option among those considered. On the

other hand, sustainable engineering is presented as an ideal to achieve, an ideal we are now just starting to envision and formalize [FIDIC, 2004]. In that perspective, it is not only sufficient to settle upon the most sustainable solution amongst those available for a given project. It is also fundamental to estimate if the preferred option is sustainable enough and if not, aim for more ambitious objectives in projects undertaken subsequently. Positioning conventional and sustainable design on a continuum emphasizes the fact that an engineer or an organization gradually moves from the former approach to the latter. From this viewpoint, it is possible to evaluate the progress accomplished as more and more projects integrate sustainability objectives. In this section, we set the foundations of a procedure which aims to reveal the different shades of sustainability existing in engineering design.

The scope of design method validation, as defined in section 4.3.4, is beyond the evaluation perspective adopted in this paper. Indeed, the purpose of the procedure is not to demonstrate the ISEDP systematically generates more sustainable solutions than do CDPs but rather to confirm sustainable design is adequately applied by practicing engineers. Elements from the frameworks reviewed which do not concern claims of generalization can nevertheless be adapted for the present application. Hence, the proposed procedure intends to shed light on the following questions.

- Congruence: are the sustainability issues considered during design in line with common and sound interpretations of sustainable development?
- Internal consistency: are the sustainability issues identified as important assessed with relevant indicators and appropriate tools?
- Effectiveness: do the options generated during design perform better than conventional ones according to sustainability criteria?

In addition, the procedure was elaborated to encompass all design stages and most key tasks identified in the ISEDP. As described in Table 4.7, conventional design is differentiated from sustainable design along six specific dimensions: (1) the structure of the design process, (2) the range of sustainability issues considered, (3) the relevance of the indicators guiding design, (4) the accuracy of the tools used to evaluate indicators, (5) the potential improvements expected from the alternatives assessed when compared to conventional solutions and (6) decision making. Internal consistency is assessed by dimensions 1, 3 and 4, congruence by dimension 2 and effectiveness by dimension 5. Whereas such associations appear rather clearly for

dimensions 1 to 5, this is not the case for the sixth dimension as it concerns both congruence and effectiveness.

The procedure includes four shades of sustainability (from A to D), A being the lightest shade (i.e. most elementary) and D the deepest (i.e. most advanced). If the lowest level of performance (shade A) is not achieved for a given dimension, then the design process can be considered conventional along this dimension. While, the number of shades need not be equal to four, the number chosen should achieve balance between needs for adequate differentiation and ease of use. Table 4.9 provides an overview of the six dimensions. Their assessment along the four shades is also illustrated by examples. As shown in Table 4.9, the evaluation of each dimension is associated with the realization of specific design tasks and can be done as the design process unfolds. The application of the procedure is thus straightforward when each task is properly documented (i.e. inputs, outputs, methods, etc.). The procedure is not presented as a separate task of the PICDI because it is performed concurrently to other tasks. A more detailed description for each dimension follows Table 4.9.

The first dimension relates to the structure of the process followed by the design team. Its assessment is based on the number of tasks composing the ISEDP, as detailed in Table 4.9. The design process selected does not necessarily need to be identical to the ISEDP proposed in this paper. It should nevertheless include tasks similar to the 12 key ones identified in Table 4.7. Obviously, carrying out all the tasks composing a SDP does not guarantee a project will be more sustainable than its conventional counterparts once implemented. However, we believe that sustainable solutions are more likely to be adopted if the broad number of related issues and strategies are dealt with in a structured manner. The second dimension concerns the range of sustainability issues considered during the design process through their associated criteria and indicators. As detailed in Table 9, the number of issues considered is an important factor, as is the coverage of issues pertaining to all pillars of sustainable development (e.g. economic, environmental and social). The number of issues characterizing each shade relates to the sustainability assessment frameworks cited in the section 4.3.3, which suggest between 7 and 45 criteria or indicators (for an average of 16) to provide a comprehensive coverage. These numbers are given as an indicative basis and can change from one project to another, depending on their nature and complexity. The choice of appropriate issues is particularly important since sustainable development and its implications for engineering are broad and debated subjects.

Table 4.9 Dimensions and shades of sustainability for engineering design

Dimensions		ISED tasks	Shades of sustainability			
			A	B	C	D
1. Design process	Was the SDP implemented?	All	Minimally	Partially	Mostly	Entirely
	<i>Example:</i> Number of tasks of the ISEDP completed (Table 7).		12 key tasks in bold	13-16 tasks, including key tasks	17-20 tasks, including key tasks	21-22 tasks, including key tasks
2. Sustainability issues covered	Are appropriate sustainability issues considered in design?	4 5 7 8	Low number of unbalanced issues	Low number of balanced issues	Acceptable number of balanced issues	High number of balanced issues
	<i>Example:</i> Number of appropriate sustainability issues covered through criteria and indicators.		4-6 issues, mostly covering a single SD pillar	4-6 issues, covering all SD pillars	7-10 issues, covering all SD pillars	More than 10 issues, covering all SD pillars
3. Relevance of the indicators	Are the indicators chosen relevant to the associated issues?	12	Indicator chosen with a partial relation to a group of issues	Indicator with a partial relation to a single issue	Indicator with a strong relation to a single issue	Indicator entirely covering a single issue
	<i>Example:</i> Indicators related to environmental issues such as climate change and resource use.		Energy use during operation phase to assess contribution to climate change and resource use	Energy use during operation to assess contribution to climate change	Carbon dioxide emissions to assess contribution to climate change	Aggregated greenhouse gas emissions to assess contribution to climate change
4. Accuracy of the analysis tools	Are the chosen tools accurate to assess the chosen indicators?	13	Minimally	Moderately	Highly	State-of-the-art
	<i>Example:</i> Evaluation of life cycle environmental impacts.		Streamlined LCA	Economic input-output LCA	Process LCA, with secondary data	Process LCA mostly with primary data
5. Performance of alternatives	What is the level of improvement when compared to a benchmark solution or the amount of progress towards an ideal solution?	15 17 18	Minimal	Fair	High	Ideal
	<i>Example:</i> Reduction in environmental impact when compared to benchmark.		Factor 1,25-1,5	Factor 1,5-2	Factor 2-5	Factor 5-20
6. Decision making	Were criteria covering all dimensions of sustainability considered in a balanced manner?	14 16 20	Minimally	Partially	Mostly	Entirely
	<i>Example:</i> Number of criteria for each pillar of sustainable development (SD) corresponding to the categories described in Table 8.		Mostly "relative, non-discriminating", with cost issues predominating	Mostly "threshold, discriminating", with cost issues predominating	Mostly "threshold" or "weighted, discriminating". Most weight to one or two SD pillars	Mostly "threshold" or "weighted, discriminating". Similar weight given to all pillars.

The third dimension is linked to the preceding one, as it depends on the level of adequacy existing between the identified sustainability issues and their associated indicators. As explained in Table 4.9, the closer an indicator is related to the issue assessed, the higher it is positioned in the shades of sustainability. An example concerning environmental impact is given in Table 4.9 to illustrate the application of this dimension. Similar grids need to be developed for the all issues considered in order to categorize potential indicators along the four shades. Contrary to the first two dimensions, for which the shade is defined for the whole design process, the third dimension is evaluated on an issue-by-issue basis, since the adequacy between issues and their associated indicators is likely to vary. Once the shade for each issue is defined, the overall performance for the third dimension can be deduced from individual performances. At first, every issue can be attributed an equal importance in order to simplify calculations. More complex methods can be considered if particular issues, criteria or indicators emerge as preponderant during subsequent stages of design.

The fourth dimension is closely linked to the third, as it serves to characterize the accuracy of the analysis tools chosen to assess the indicators previously defined. Table 4.9 illustrates how the shade for this dimension can be defined in the case of different life cycle assessment methods providing increasingly accurate results. The way each shade is defined along the fourth dimension is likely to change in time, as more accurate tools are developed and state-of-the-art practices evolve with experience being acquired in the different fields of sustainability science. Similar to the third dimension, the shade of a project for this dimension is evaluated on an indicator-by-indicator basis. Grids describing shades for each indicator have to be elaborated and the overall performance can then be derived from individual scores.

The fifth dimension pertains to the performance of the considered alternatives along the chosen sustainability indicators and aims to highlight the potential level of improvement provided by these options. It provides the design team feedback on the alternatives generated by evaluating how close (or how far) each one of them is from an ideal sustainable solution. This implies an ideal performance has to be defined according to each indicator. An example related to the evaluation of environmental impacts is given in Table 4.9. The evaluation is expected to get progressively more precise as the design team moves from preliminary design to detailed design. While the actual performance can only be known after the chosen option is implemented, the

evaluation performed during detailed design should be representative unless major changes occur during subsequent life cycle phases.

This dimension is also assessed on an indicator-by-indicator basis, thus complicating the calculation of an overall performance. Two distinct approaches are conceivable, each corresponding to a different perspective based on the type of information sought. On the one hand, it can be considered useful to identify how each option globally compares to an ideal solution. The aggregate score can thus be calculated for every option based on their performance for each indicator. In that case, the shade for the fifth dimension would correspond to the overall shade of the best performing option. On the other hand, the design team might want to know if the strengths of each option, when combined, could provide an ideal solution. An aggregate score would again be calculated, this time based on the best performing option for each individual indicator. An intermediate approach can also be chosen, based on the score of the best option for each of the three main pillars of sustainability. For example, two alternatives could have the following overall profiles along environmental, social and economic criteria: B-C-A for option 1 and C-A-B for option 2. The combined performance along which the shade could be defined is in that case C-C-B. Such a result suggests that each alternative holds a relatively high potential for improvement for at least one dimension and that an option combining the best aspects of both alternatives should be considered in a subsequent project.

The sixth and last dimension in the procedure concerns the decision making process leading to the choice of the concept to be implemented. As mentioned previously, this relates to both effectiveness and the congruence:

- To be effective, the design process must ultimately lead to the implementation of solutions that perform better than conventional ones.
- Decision makers will demonstrate congruence if their choice is coherent with the sustainability principles they claim to embrace.

The shades refer to the types of criteria (defined in Table 4.8) considered during decision making. As illustrated in Table 4.9, the more dimensions of sustainable development are taken into account in a balanced way (i.e. are given similar importance), the deepest is the shade. This is based on the fact that sustainable engineering strives to develop solutions with a high level of performance along all three sustainability pillars simultaneously.

4.6 Discussion

An overview of how the various dimensions of sustainable design relate one to another is now provided. The following remarks emphasize how a low score for a given dimension cannot be entirely compensated by good performances according to other dimensions. This, in turn, affects the potential applications of the procedure, as detailed later in the discussion.

First, it is possible for a design process to score reasonably well on most dimensions, except the fifth one concerning the relative performance of alternatives. In this situation, sustainability issues would have been well defined and options well assessed. Nevertheless, if truly sustainable solutions are sought, this cannot fully compensate the fact that the alternatives considered were not different enough from conventional solutions. Such an outcome points out to a lack of creativity and indicates that the design team has to consider more diverse or radical options in future projects. Second, a good result on the fifth and sixth dimensions combined with relatively low scores for most preceding dimensions raises doubts on the soundness of conclusions drawn during design. Key sustainability issues might have been ignored, giving only a partial picture of the project, or solutions might have been assessed in an imprecise manner, limiting the possibilities to discriminate one option from another. The design team would need to explain these limitations when the final design is communicated to clients or stakeholders. The third situation is the opposite of the one just above, whereas low scores on the fifth and sixth dimensions coincide with a good performance for all other dimensions. This would indicate that efforts made to well circumscribe the problem at stake did not materialize into tangible results. Nevertheless, an engineer or an organization is likely to benefit, in subsequent projects, from this capacity to generate and assess solutions in a sustainable manner.

The multi-dimensional nature of the procedure elaborated inevitably raise questions on compensation or comparability between the dimensions of sustainable design. We will now suggest different ways to tackle this issue, depending on the intended application of the procedure. In the case it is used for auto-evaluation purposes by an organization committed to improve current practices, the procedure will primarily serve to highlight dimensions along which the actual design process is least satisfying (i.e. identification of weak links). For this application, the calculation of a single score or the definition of an index is not necessarily relevant, since improvements along all dimensions, with priority given to the lowest scoring ones, should be targeted.

The procedure can also provide a critical picture of engineering practice, at a given moment and through time, based on the comparative analysis of a selection of projects. In this case, all dimensions can be considered individually and projects compared by the use of radar plots. To simplify the comparison between groups of projects realized at different times, a composite indicator (or aggregate index) might be required. As discussed in OECD [2008], the development of composite indicators is, by itself, a vast and complex subject. Hence, we do not propose a particular aggregation method, but we believe the two following factors should be considered when choosing one:

- The different dimensions of sustainable design relate to different stages in the design process itself. These stages are linked and influence one another, as it is also the case for the dimensions. Any weighting set should be defined considering that, while each dimension might not be equally important, all play a significant role in sustainable design.
- Progress achieved during a given project must be given credit, even if it concerns only a few dimensions, because the experience gained will be useful in subsequent projects. Nevertheless, weak scores for some dimensions cannot be entirely compensated by strong ones for others. The aggregation method chosen must thus be sensible to these low scores.

The last application, and probably the most delicate, is the characterization by an organization of its design practices to make public claims about their contribution to sustainable development. The previous discussion concerning aggregation applies if the use of a single indication is desired by the organization. In addition, measures inspired from those in standards for life cycle assessment [ISO, 2006a] to prevent abusive claims are necessary to ensure the validity and comparability of such declarations (e.g. transparent and detailed reporting, reference to recognized practices, independent external review, etc.). The use of the ISEDP and the associated evaluation of the shades of sustainable design are the subject of a PhD research project currently underway. Their application in a case study concerning a wastewater system will be described and discussed in the thesis.

Regardless of the intended application, the evaluation of a given design project by two different persons or groups will probably differ to some extent. However, this is merely the reflection of an already existing state of affairs: projects or products are often described as “sustainable” by some while their beneficial attributes are criticized by others. The fact that such claims are not always justified might explain, at least partially, scepticism expressed towards the concept of sustainable

development itself. The strength of the proposed procedure comes from directly tackling this problem: it allows people to expose in a structured and transparent manner on what grounds their approach to design can be considered sustainable. In turn, this makes it easier for people to understand perspectives different from their own and adapt assessments performed by others. The procedure also offers professionals and organizations committed to sustainable engineering a comprehensive picture of their current position along the different shades of sustainable design. While acknowledging efforts being made in the present, the procedure also serves as a road-map by setting ambitious objectives for each phase of the design process. Finally, it supports the appropriate use of the term “sustainable development” in the engineering community by offering more critical and lucid insights on the progress made during the last decade as well as on the challenges still facing us.

4.7 Conclusions

In the light of existing sustainable design processes and sustainable decision-making frameworks, it was possible to identify a series of tasks differentiating sustainable from conventional design. Furthermore, crucial complements were derived from issues emerging in the field of sustainability and integrated into the ISEDP. The review of recent approaches proposed in design research also provided a complementary perspective on sustainable design. A procedure based on existing frameworks for the validation of design methods was then elaborated to evaluate how sustainable design contrasts with its conventional counterpart. Fundamental differences are captured through six dimensions for which four distinct shades are defined. The procedure is closely tied to the ISEDP so the evaluation of the shades of sustainability can be performed as the design process unfolds. Based on the description of the dimensions as well as the discussion of potential applications, the procedure appears comprehensive and flexible enough for engineers or organizations to build upon it in case studies. Its use should allow them to advance in a structured and transparent manner towards the integration of sustainability issues into design activities. Further refinement of the ISEDP and dimensions of sustainable design necessitates their implementation in real-life projects. These will also contribute to illustrate their usefulness as well as their eventual limitations.

Chapitre 5 ÉLABORATION DU CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Le projet porte sur deux thèmes, soit l'intégration des principes du développement durable à la pratique de l'ingénierie et la conception des systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées selon ces principes. Les étapes 1 à 5 de la recherche sont associées au premier thème et sont couvertes dans les deux articles constituant les chapitres 3 et 4 de la thèse. Ainsi, les grandes lignes de la méthodologie suivie pour ces étapes ont été déjà décrites dans les deux chapitres précédents, accompagnés des principaux résultats obtenus. Néanmoins, certains détails complémentaires sont offerts à la section 5.1.

L'aboutissement des premières étapes de la recherche, soit un cadre structuré permettant de mettre en œuvre la conception durable sert de base pour les étapes subséquentes. Ainsi, les étapes 6 à 8 sont rattachées au second thème et sont centrées sur l'application du PICDI au SMAEU de Deauville, incluant l'évaluation du SMAEU dans sa configuration existante selon des critères de développement durable. La méthodologie suivie spécifiquement pour ces étapes est présentée à la section 5.2 et leur réalisation, qui constitue le cœur de la thèse, est rapportée aux chapitres 6 et 7. Les étapes de la méthodologie suivie pour l'ensemble du projet de recherche ainsi que les liens entre elles sont présentés à la figure 5.1.

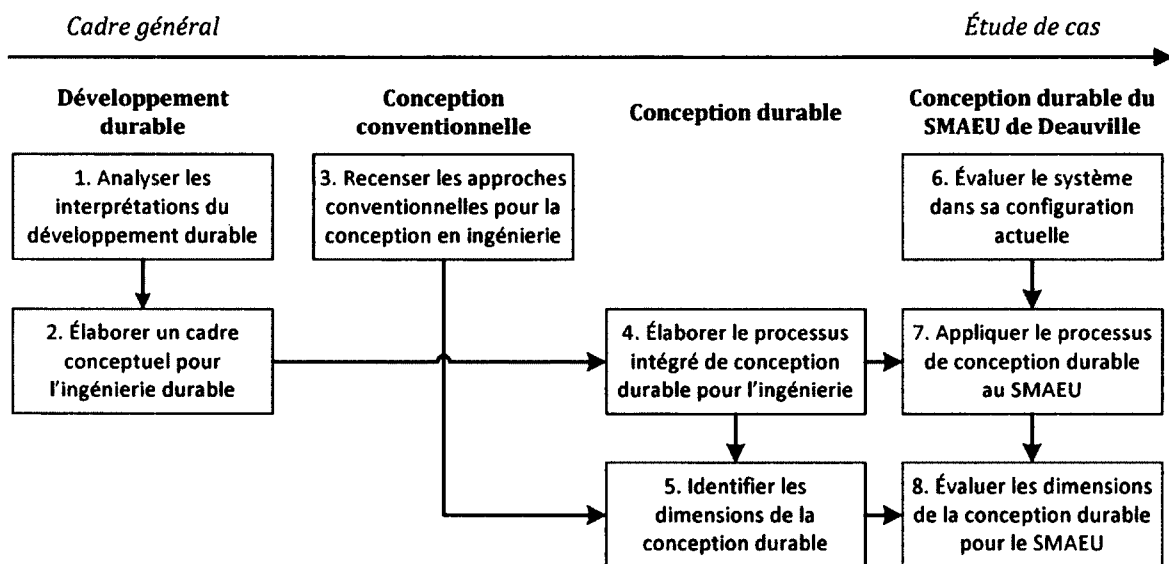


Figure 5.1 Aperçu de la méthodologie développée

5.1 Développement durable et conception en ingénierie

L'analyse des interprétations du développement durable et l'élaboration d'un cadre conceptuel pour l'ingénierie durable ont tout d'abord permis d'asseoir la recherche sur de solides

fondations. La conception durable a ensuite été abordée de manière originale grâce au recensement des approches conventionnelles de conception, à l'élaboration du processus intégré de conception durable (PICDI) et l'identification des dimensions de la conception durable.

5.1.1 Étape 1 : Analyser les interprétations du développement durable

Tel qu'abordé aux sections 3.2 et 3.3, des listes de principes du développement durable (générales et propres à l'ingénierie) ont été étudiées à l'aide de l'analyse de contenu thématique. Cette approche est brièvement présentée à la section 3.2, mais quelques précisions sont apportées pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus. L'analyse de contenu « a pour but de connaître la vie sociale à partir de [la] dimension symbolique des comportements humains » [Sabourin, 2004]. Autrement dit, les documents de toute sorte (les symboles sociaux) sont le reflet de la société et peuvent donc être interprétés pour mieux saisir comment s'articulent certains concepts. Cette approche est ici mobilisée pour mieux comprendre l'interprétation qui peut être faite du développement durable ainsi que de son application au domaine de l'ingénierie. L'analyse de contenu comporte trois étapes [Sabourin, 2004] : (1) la constitution de la base de la connaissance; (2) la description des documents et (3) le formalisme de l'analyse.

La constitution de la base de la connaissance nécessite de recenser les documents (ou autres discours sociaux) relatifs à la problématique puis à sélectionner certains d'entre eux. Les écrits reconnus ont ici été privilégiés pour faciliter l'analyse quantitative. Ceux-ci incluent des rapports, guides ou déclarations d'organisations internationales et nationales ainsi que des articles scientifiques. Les documents recensés devaient faire explicitement référence au caractère multidimensionnel du développement durable, c'est-à-dire ne pas uniquement s'attarder à une catégorie d'enjeux particuliers, par exemple les enjeux environnementaux. La description des documents consiste à en extraire les éléments significatifs, soit les principes du développement durable, puis à classer ces derniers selon des thèmes ou des catégories. L'identification des éléments significatifs se nomme segmentation et a été réalisée en retranscrivant chacun des principes recensés dans un format similaire. La classification des principes a ensuite été effectuée selon les dimensions économique, sociale et environnementale. Les sept catégories choisies couvrent les principes unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels. La représentation de ces catégories et leurs définitions respectives sont données à la section 3.2. En dernier lieu, le formalisme de l'analyse sert à décrire les régularités soulevées dans les documents. Les principes recensés ont été analysés de manière quantitative en identifiant leur répartition selon les catégories définies auparavant, puis de manière qualitative, en synthétisant

les thèmes dominants pour chacune des catégories. Les principes extraits des documents consultés, leur classification et leur synthèse sont disponibles aux annexes A et B.

5.1.2 Étape 2 : Élaborer un cadre conceptuel pour l'ingénierie durable

Le cadre conceptuel présenté à la section 3.5 est basé sur une série de concepts, modèles et théories brièvement décrits à la section 3.4. La démarche suivie pour élaborer ce cadre est détaillée ici, notamment en clarifiant la terminologie employée. Un concept est « une idée plus ou moins abstraite, un symbole qui désigne ou représente une réalité plus ou moins vaste » [Tremblay, 1968] et qui possède « une signification générale pour un ensemble de représentations concrètes » [Office québécois de la langue française, 1990]. Le modèle se base pour sa part sur de multiples concepts et décrit comment ils sont reliés. Un modèle constitue une représentation simplifiée d'un phénomène et n'inclut que les concepts jugés pertinents à sa compréhension. Un modèle vérifié ne constitue une théorie, mais la validation de modèles est cruciale à l'élaboration de théories. Ainsi, la théorie est un « ensemble de proposition logiquement reliées, encadrant des faits observés et formant un réseau de généralisation dont on peut dériver des explications pour un certain nombre de phénomènes » [Gingras, 2004].

Le cadre conceptuel diffère du modèle et de la théorie, car il ne vise pas le même niveau de validité scientifique. Il incorpore néanmoins de nombreux concepts et articule ceux-ci de façon logique. Le cadre conceptuel a été élaboré avec l'intention de brosser un portrait complet du développement durable et de ses implications pour l'ingénierie. Ce cadre ne peut être considéré comme un modèle ou une théorie vérifiable même s'il est construit avec rigueur et de cohérence. Il constitue malgré tout un des fils conducteurs du projet de recherche. Le cadre conceptuel est développé selon une approche systémique, celle-ci s'avérant nécessaire pour bien saisir les interrelations entre les dimensions économique, sociale et environnementale du développement durable [Bossel, 1999]. Pour couvrir l'ensemble des dimensions du développement durable, autant les systèmes biophysiques que les systèmes sociaux ont été inclus dans l'analyse.

La démarche suivie pour l'élaboration du cadre conceptuel en fait un outil à la fois *descriptif* et *prescriptif*. Le caractère descriptif du cadre conceptuel est assuré par l'inclusion des systèmes et sous-systèmes apparaissant prépondérants dans la littérature. Chacun d'entre eux devait également être défini de façon à ce que le cadre conceptuel soit cohérent dans son ensemble. L'objectif était d'obtenir un cadre suffisamment exhaustif pour pouvoir identifier les principales interactions existant entre les projets d'ingénierie et leur contexte environnemental et social,

tout en ne détaillant pas de manière excessive les ramifications propres à chacune des disciplines considérées. Le volet prescriptif est pour sa part lié à la compatibilité du cadre conceptuel avec les principes du développement durable. Ainsi, il est souhaitable que les interactions entre les composantes du cadre soient compatibles avec les principes définis au préalable.

5.1.3 Étape 3 : Recenser les approches conventionnelles de conception

La revue de littérature portant sur les processus de conception conventionnels réalisée à la section 4.3.1 a permis de définir un processus de conception conventionnelle générique. La principale utilité de ce processus est de mettre en évidence les tâches complémentaires associées à la conception durable (étape 4) pour pouvoir ensuite mieux identifier les dimensions de la conception durable (étape 5).

5.1.4 Étape 4 : Élaborer le processus intégré de conception durable

Les processus de conception durable recensés à la section 4.3.4 ont été analysés en deux temps, tel que décrit à la section 4.4. Tout d'abord les éléments affichant un haut niveau de consensus ont été identifiés. Ensuite certains enjeux cruciaux n'y étant pas traités de manière satisfaisante ont été mis en évidence. Le PICDI proposé à la section 4.4 résulte de cette analyse. Ses particularités sont exposées par son application à la modernisation d'un SMAEU (étape 7).

5.1.5 Étape 5 : Identifier les dimensions de la conception durable

L'approche utilisée pour identifier les dimensions de la conception durable est présentée à la section 4.5. Celle-ci s'inspire à la fois des procédures pour valider les méthodes de conception (section 4.3.4) ainsi que des tâches clés du PICDI. Les teintes de la conception durable servent à évaluer le niveau de mise en œuvre du PICDI. Tel que défini aux sections 4.5 et 4.6, les quatre teintes s'expriment différemment pour chacune des dimensions. L'application du PICDI, des dimensions et des teintes au projet de modernisation du SMAEU de Deauville est traitée plus en détails à l'étape 8 de la méthodologie. Avant de présenter les étapes portant sur l'étude de cas, les facettes de la conception durable des SMAEU sont abordées à la section 5.2.

5.2 Conception durable du SMAEU de Deauville

La méthodologie propre à l'étude de cas est décrite dans cette section. L'évaluation du SMAEU de Deauville dans sa configuration actuelle précède l'application du PICDI pour la modernisation de ce SMAEU ainsi que la discussion de sa mise en œuvre.

5.2.1 Étape 6 : Évaluer le système dans sa configuration actuelle

L'évaluation du système existant, bien qu'utile pour la mise en œuvre subséquente du PICDI ne constitue pas en soi une étape du PICDI. Cette contribution est mise en évidence au chapitre 7. L'évaluation a été réalisée selon deux volets distincts mais complémentaires. Le premier volet porte sur la performance technique du système et vise notamment à évaluer son niveau de conformité par rapport aux exigences gouvernementales. Le second volet se concentre pour sa part sur l'évaluation du système selon des critères de développement durable. Cette évaluation avait notamment pour objectif d'acquérir une connaissance adéquate du système dans sa configuration actuelle avant d'amorcer la conception de sa modernisation. L'analyse des parties prenantes a permis d'orienter l'évaluation selon les volets technique et du développement durable et est décrite en premier lieu.

Analyse des parties prenantes

Tel que soulevé à la section 2.3.2, les principales étapes de l'analyse des parties prenantes sont: (1) leur identification et leur classification; (2) l'identification de leurs intérêts; (3) l'étude des relations entre les parties prenantes; et (4) l'évaluation des pouvoirs que celles-ci possèdent. L'identification des parties prenantes s'est faite par l'intermédiaire de rencontres avec des personnes impliquées depuis plusieurs années dans la gestion et le suivi du système. Une revue de presse a aussi permis de compléter les informations recueillies. Les parties prenantes identifiées ont ensuite été classées selon deux catégories : primaires et secondaires. Les parties prenantes primaires sont celles susceptibles d'être directement affectées par un problème ou une intervention concernant le SMAEU, tandis que les parties prenantes secondaires sont celles jouant un rôle d'intermédiaire dans la résolution du problème à l'étude.

Les intérêts et les motivations des parties prenantes sont principalement de nature financière (coûts ou bénéfices potentiels), personnelle (effets sur la qualité de vie), éthique (compatibilité avec les valeurs) ou politique (modifications dans la répartition des pouvoirs). De multiples approches sont envisageables pour l'identification des intérêts des parties prenantes. Les plus simples d'entre elles ont été utilisées, soit le remue-méninges, la consultation de documents existants et les lignes du temps [OCDE, 2002]. Certaines des parties prenantes peuvent être en relation directe, que ce soit de façon positive (alliance) ou négative (conflit). Le type de relation existant entre certaines parties prenantes influencera leur propension ou leur capacité à collaborer entre elles. Comme les pouvoirs dont dispose chaque partie prenante affectent son influence potentielle, la caractérisation de ces pouvoirs est essentielle pour compléter l'étude des

intérêts et des relations. Les pouvoirs des parties prenantes identifiées ont été scrutés selon quatre principales catégories, soit le pouvoir de gestion (capacité à contrôler les activités), le pouvoir exécutif (capacité à répondre aux besoins et demandes), le pouvoir de négociation (capacité à obtenir des ressources ou des concessions) et le pouvoir positionnel (capacité d'obtenir la sympathie et le support) [OCDE, 2002].

L'ensemble des données obtenues sur les intérêts, les pouvoirs et les relations des parties prenantes ont par la suite été synthétisées. Celles-ci sont accompagnées d'informations sur l'importance accordée à la prise en compte du développement durable dans leurs activités. Tel que mentionné par après, les parties prenantes ont participé à l'évaluation du système autant selon le volet technique que le volet social du développement durable.

Volet technique

L'évaluation technique du système vise le réseau de collecte des eaux usées, la station d'épuration et les boues d'épuration. Pour le réseau de collecte, le respect des exigences aux ouvrages de surverse au cours des années 2003 à 2008 a tout d'abord été étudié. Les données sur les ouvrages de surverse sont amassées par la Ville de Sherbrooke puis transmises au ministère des Affaires municipales, des Régions et le l'Occupation du territoire (MAMROT) dans le cadre du suivi annuel du système. L'analyse des débits horaires a ensuite rendu possible la caractérisation des débits d'eaux usées domestiques et parasites transportées par le réseau. Les données sur les débits sont acquises par un système de télémétrie exploité par un partenaire externe, puis transmises à la Ville de Sherbrooke pour leur compilation. Seuls les débits des années 2005 à 2008 sont en partie disponibles.

La station d'épuration a été étudiée selon une approche similaire. Le respect des exigences de rejet au cours des années 2003 à 2008 a tout d'abord été validé. Les analyses requises ont été réalisées par un laboratoire accrédité sur des échantillons pris à l'affluent et à l'effluent de la station par les employés de la Ville de Sherbrooke. Le resserrement des exigences envisagé dans la stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales [CCME, 2009] a également été pris en compte dans l'évaluation. De manière complémentaire, la dynamique épuratoire a été modélisée selon l'approche proposée dans le guide de conception émis par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs [MDDEP, 2010a]. Finalement, les propriétés des boues ont été comparées avec les lignes directrices visant la

valorisation des matières résiduelles fertilisantes [MDDEP, 2008]. Leur taux d'accumulation a aussi été estimé. Pour faciliter sa compréhension, la méthodologie déployée pour ces analyses est décrite plus en détail à la section 6.3, suite à une présentation complète de la configuration du réseau et de la station à la section 6.2.

D'autres aspects techniques ont également été investigués en consultant quelques experts possédant une bonne connaissance du SMAEU. Les thèmes étudiés sont inspirés des critères recensés à la section 2.6.3, soit les conditions de travail, la robustesse du système, l'adaptabilité du système, la facilité de construction et la facilité d'opération et d'entretien. De manière à accroître la pertinence des informations recueillies, l'échantillon a été choisi en fonction de la capacité de répondre des participants et de leur disponibilité [Blais et Durand, 2004]. La petite taille du SMAEU ainsi que le caractère des questions a imposé un échantillon réduit, celui-ci étant composé de quatre personnes :

- Un ingénieur ayant travaillé à la conception du système.
- Un fonctionnaire du MDDEP responsable du suivi des ouvrages d'assainissement.
- Un employé de la Ville de Sherbrooke responsable du suivi du système.
- Un employé de la Ville de Sherbrooke responsable de l'opération du système.

Vu la petite taille de l'échantillon, le questionnaire a été administré en personne. Celui-ci débute par une mise en contexte où les objectifs du sondage et la configuration du système sont brièvement décrits. Les questions fermées, avec évaluation sur une échelle à sept niveaux de type Likert, sont complétées par des questions ouvertes où les répondants ont l'opportunité de détailler leur évaluation. Le questionnaire est disponible à l'annexe D.

Volet développement durable

Le choix des critères de développement durable ainsi que celui des outils utilisés pour leur évaluation se base sur la revue de littérature exhaustive réalisée à ce sujet et discutée à la section 2.6.4. Les critères, indicateurs et outils retenus sont classés selon les trois dimensions et énumérés au tableau 5.1. Chacun des outils mentionnés au tableau 5.1 possède une méthodologie qui lui est propre. Les étapes de leur mise en œuvre sont présentées ci-après, tandis que leur application au SMAEU de Deauville est exposée en détail à la section 6.4.

Tableau 5.1 Cadre pour l'évaluation de la durabilité du SMAEU existant

Dim.	Critère	Indicateur	Outil
Env.	Consommation des ressources	Utilisation des ressources non renouvelables	AECV
	Impact sur la santé humaine	Impact potentiel sur la santé humaine	
	Impact sur les écosystèmes	Impact potentiel sur les écosystèmes	
Écon.	Coûts de conception et de construction	Coûts engagés pour la conception et la construction	ACCV
	Coûts d'opération et d'entretien	Coûts actuels pour l'opération et d'entretien	
	Coûts en fin de vie	Coûts estimés pour la fin de vie	
	Bénéfices	Valeur accordés aux bénéfices engendrés par le SMAEU	Évaluation monétaire des services environnementaux
Soc.	Équité	Proportion du revenu des ménages consacré au financement du SMAEU	Analyse distributionnelle de la charge financière
	Accessibilité (prix)		
	Sensibilisation et connaissances	Sensibilisation à l'utilité du système et compréhension de son fonctionnement	Consultation des parties prenantes
	Comportements responsables	Adoption de comportements compatibles avec le bon fonctionnement du système	
	Capacité organisationnelle	Capacité de l'organisation responsable à opérer et gérer le système	
	Nuisances	Génération de nuisances	
	Satisfaction	Niveau de satisfaction des citoyens envers le service fourni	Sondage auprès des citoyens

Analyse environnementale du cycle de vie

La réalisation d'une analyse environnementale du cycle de vie (AECV) comporte quatre principes phases [ISO, 2006a]: la définition des objectifs et du champ d'étude, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation de l'impact et l'interprétation. La définition des objectifs permet de cibler l'application envisagée, les raisons ayant mené à réaliser l'étude ainsi que le public visé. Dans le présent projet, l'AECV sert à caractériser le profil environnemental du système existant en vue de sa modernisation. Le public visé est constitué d'employés de l'organisation responsable du système, soit la Ville de Sherbrooke, mais peut inclure d'autres parties prenantes.

La définition du champ d'étude demande pour sa part d'identifier la fonction du système, l'unité fonctionnelle et de poser les frontières du système à l'étude. La fonction exprime à quel besoin répond le système, tandis que l'unité fonctionnelle quantifie la fonction rendue pour faciliter la comparaison de différents scénarios sur une base commune. La définition des frontières du système à l'étude permet de cibler les principaux processus devant être inclus dans l'étude et

ainsi circonscrire la recherche de données. Le système à l'étude est représenté sous la forme d'un arbre de processus couvrant l'ensemble des étapes du cycle de vie, tel qu'illustré à la figure 5.2.

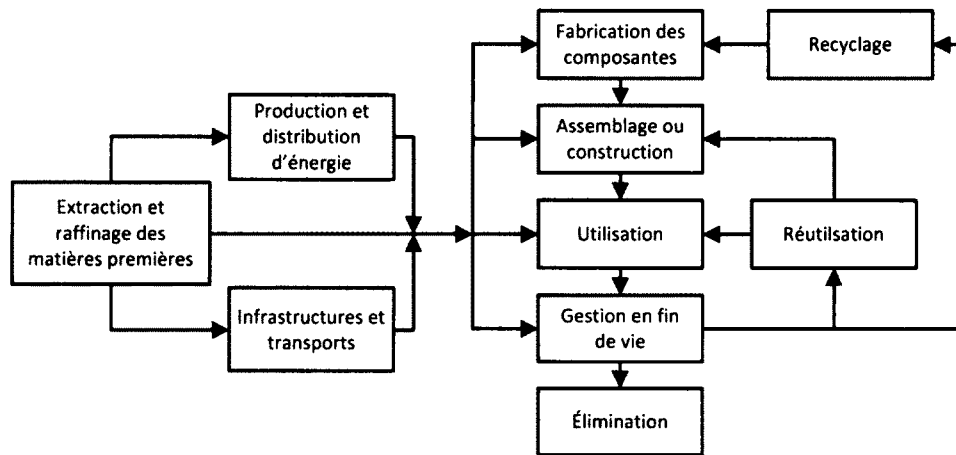


Figure 5.2 Arbre des processus typique, adapté de Jolliet *et al.* [2010]

La phase de l'analyse de l'inventaire consiste à compiler l'ensemble des émissions et extractions associées aux processus inclus dans le champ d'étude. L'inventaire de production est tout d'abord calculé, permettant de quantifier les matériaux, l'énergie et les composantes nécessaires sur le cycle de vie. Les facteurs d'émission et d'extraction associés à chacun des éléments préalablement identifiés doivent ensuite être estimés pour calculer l'inventaire total. Les données pour l'inventaire de production ont principalement été tirées des soumissions, plans et devis pour la construction ainsi que des rapports d'opération. Certaines données manquantes ou incomplètes ont également été estimées selon des hypothèses réalistes. Les facteurs d'émission et d'extraction proviennent pour leur part de banques de données secondaires, principalement la banque de données Ecoinvent v2.2 [Ecoinvent Centre, 2010].

Les résultats de l'analyse de l'inventaire sont difficiles, voire impossible, à interpréter directement, car ils contiennent les émissions et les extractions pour de nombreuses substances et ressources. L'évaluation des impacts permet d'associer chacune des extractions et émissions à un nombre plus restreint d'impacts environnementaux, facilitant ainsi l'interprétation des résultats. L'évaluation des impacts comprend quatre étapes, les deux premières (la classification et la caractérisation) étant obligatoires et les deux autres (la normalisation et la pondération) facultatives. L'évaluation des impacts a été réalisée grâce selon le modèle ReCiPe [Goedkoop *et al.*, 2009], un modèle européen récent qui permet la caractérisation sur la base des dommages ainsi que la normalisation et la pondération. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux

évalués par le modèle nord-américain TRACI2 [Bare, 2011]. La compilation de l'inventaire et des impacts a pour sa part été faite avec le logiciel SimaPro (version 7.3). L'interprétation constitue la dernière phase de l'AECV et vise à mettre en perspective l'ensemble des choix faits lors des étapes précédentes en plus de discuter des résultats obtenus. L'identification des points chauds, c'est-à-dire les étapes du cycle de vie du système qui ont le plus fort impact, a tout d'abord été effectuée. Celle-ci a été complétée par une série de contrôles et d'analyse permettant de confirmer la qualité et la robustesse des résultats obtenus.

Analyse des coûts sur le cycle de vie

Contrairement à l'AECV, l'analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV) n'est pas traitée par une série de normes. Ainsi, la méthode utilisée diffère d'un secteur ou d'une étude à l'autre. Hunkeler *et al.* [2008] distinguent trois types d'ACCV ne partageant pas les mêmes bases méthodologiques:

- L'ACCV conventionnelle couvre les coûts internes assumés par un acteur en particulier, par exemple le producteur ou le consommateur. Ce type d'ACCV n'inclut habituellement pas les coûts en fin de vie et néglige parfois une certaine portion des coûts d'utilisation.
- L'ACCV environnementale, réalisée en parallèle à l'AECV, se base sur la série de normes ISO 14040. Les coûts assumés par l'ensemble des acteurs impliqués dans le cycle de vie y sont considérés. Les coûts externes dont l'internalisation est imminente sont également inclus.
- L'ACCV sociétale couvre pour sa part l'ensemble des coûts internes pour tous les acteurs concernés, exactement comme l'ACCV environnementale. Elle inclut en plus tous les coûts externes identifiables. Ce type d'ACCV s'apparente à l'analyse coûts-avantages.

Les coûts inclus dans chaque type d'ACCV sont illustrés à la figure 5.3.

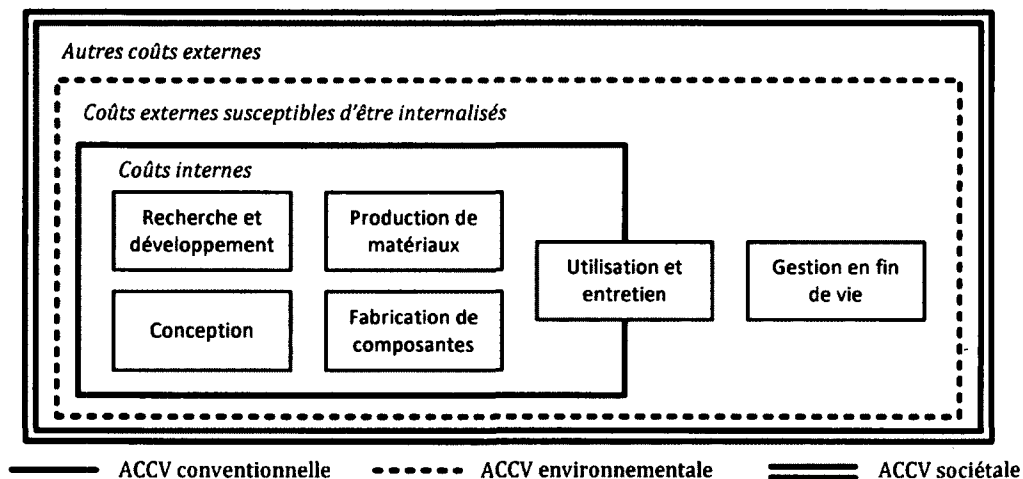


Figure 5.3 Types d'ACCV, adapté de Hunkeler *et al.* [2008]

Comme l'ACCV est utilisée conjointement avec l'AECV, la structure propre à l'ACCV environnementale a été retenue. De manière similaire à l'AECV, celle-ci comporte quatre principales phases [Hunkeler *et al.*, 2008]: la définition des objectifs et du champ d'étude, la collecte des données, l'interprétation et l'identification de points sensibles ainsi que l'analyse de sensibilité et la discussion. La phase de définition des objectifs et du champ d'étude est pratiquement identique à celle effectuée pour l'AECV. Deux objectifs complémentaires sont toutefois considérés, soit l'évaluation des coûts totaux et l'identification des étapes du cycle de vie auxquelles correspondent les coûts les plus élevés.

La collecte de données requiert principalement d'obtenir les coûts passés et présents engagés par les acteurs impliqués si l'ACCV est réalisée sur un système durant sa phase d'opération. Pour le SMAEU à l'étude, les coûts de conception et de construction ont été tirés des soumissions retenues ainsi que des ententes de financement conclues avec le gouvernement provincial. Les coûts d'utilisation et d'entretien ont pour leur part été trouvés dans les budgets d'opération. Les coûts futurs ont été projetés sur la base des coûts passés en tenant compte de l'inflation. En dernier lieu, les coûts de fin de vie ont été estimés en fonction du sort actuellement réservé aux différentes composantes dans le secteur de la construction.

L'interprétation des résultats implique de procéder à l'actualisation des coûts, ce qui permet leur compilation sur une base commune. Les coûts engagés sur le cycle de vie du SMAEU ont été actualisés en dollars courants de 2008 à l'aide de taux propres au secteur public. Les étapes du cycle de vie ainsi que les sous-systèmes auxquels correspondent les coûts les plus importants ont ensuite pu être identifiés. En dernier lieu, l'analyse de sensibilité a permis d'évaluer l'influence de certains paramètres ou hypothèses sur les résultats finaux. Les facteurs inclus dans l'analyse de sensibilité sont ceux ayant été identifiés comme prépondérants lors de l'interprétation des résultats, notamment le taux d'actualisation.

Consultation des parties prenantes

De manière similaire à ce qui a été fait pour le volet technique, certains aspects sociaux ont été étudiés par l'intermédiaire d'une consultation menée auprès de quelques parties prenantes. Les thèmes traités sont inspirés des critères recensés à la section 2.6.3, soit la sensibilisation et les connaissances, les comportements responsables, la capacité organisationnelle, les nuisances, l'équité et l'acceptabilité. Les participants ont été choisis en fonction de leur connaissance des

enjeux relatifs au SMAEU à l'étude et de leur disponibilité pour faciliter la cueillette d'informations pertinentes. La démarche est de nature exploratoire et a permis d'identifier les principales lacunes du SMAEU. Ainsi, un échantillon limité de quatre personnes a été retenu :

- Deux conseillers municipaux représentant les citoyens desservis par le système.
- Un employé de la Ville de Sherbrooke responsable du suivi du système ayant de fréquentes interactions avec les citoyens desservis.
- Un représentant de l'association de protection du lac Magog (APLM).

Le questionnaire a été administré en personne et possède la même structure que celui utilisé pour le volet technique (questions fermées suivies de questions ouvertes). Ce questionnaire est disponible à l'annexe E. Les citoyens desservis par le SMAEU ont pour leur part été consultés sur une base plus étendue lors de l'évaluation monétaire des biens et services environnementaux.

Évaluation monétaire des biens et services environnementaux

Il a été mentionné à la section 2.3.2 que les biens et services fournis par l'environnement n'étaient pas habituellement transigés sur les marchés, mais qu'ils possédaient tout de même une valeur pour les individus qui en bénéficient. Les différentes formes que peuvent prendre la valeur qui leur est attribuée sont décrites au tableau 5.2 [OCDE, 1995]. L'ensemble des techniques servant à l'évaluation monétaires des biens et services environnementaux reposent sur deux concepts fondamentaux, soit la volonté de payer (VDP) et le consentement à accepter (CAA). La VDP correspond au montant qu'un individu est prêt à défrayer pour la préservation d'un bien ou d'un service environnemental tandis que le CAA est associé à la compensation qu'un individu serait prêt à accepter pour tolérer sa dégradation [Field et Olewiler, 2002].

Tableau 5.2 Valeur accordée aux biens et services environnementaux

	Composante	Description
Valeur d'usage	Valeur d'usage directe	Associée à des ressources naturelles pouvant être consommées directement. Leur valeur est définie sur le marché.
	Valeur d'usage indirecte	Découle des avantages fonctionnels qu'il est possible de retirer de l'environnement. Celui-ci peut contribuer à épurer, protéger les communautés, réguler le climat, être le lieu d'activités, etc.
	Valeur d'option	Associée aux usages directs ou indirects qu'il est possible de faire de l'environnement dans le futur.
Valeur de non-usage	Valeur patrimoniale	Liée à la volonté de transmettre l'environnement dans un état satisfaisant à nos descendants.
	Valeur d'existence	Associée à la satisfaction ou au réconfort éprouvé par le simple fait de l'existence d'une composante environnementale.

De nombreuses techniques, dont un survol est proposé à la section 2.3.2, existent pour réaliser ce genre d'évaluation. La plupart reposent sur les préférences révélées, c'est-à-dire sur les comportements des différents acteurs, tandis que l'évaluation des contingences mise plutôt sur les préférences déclarées par l'intermédiaire de sondages. Dans la présente étude, cette dernière méthode a été utilisée pour estimer la valeur accordée par les ménages aux biens et services environnementaux préservés par le SMAEU. L'évaluation des contingences a été choisie car elle est flexible, facile à mettre en œuvre, en plus d'être la plus couramment utilisée pour l'évaluation des biens et services environnementaux [Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada, 2007].

Divers formats d'élicitation sont envisageables pour amener les répondants à révéler leur VDP ou leur CAA [Venkatachalam, 2004; Welsh et Poe, 1998]:

- Le choix dichotomique, par lequel est offert au répondant de contribuer ou non un montant donné à la réalisation d'un projet préservant la qualité de l'environnement.
- La question ouverte, posée pour connaître précisément le montant que le répondant est prêt à contribuer pour appuyer le projet.
- L'enchère, durant laquelle le répondant est ensuite amené à se prononcer sur sa contribution pour une série de valeurs croissantes (réponse initiale positive) ou décroissantes (réponse initiale négative) jusqu'à ce que la VDP ait été identifiée.
- La carte de paiement, contenant une série de montants parmi lesquels le répondant identifie celui se situant le plus près de sa VDP.
- Le choix dichotomique à bornes multiples, où le répondant se voit présenter une série de montants pour lesquels il indique si ceux-ci correspondent oui, peut-être ou non à sa VDP.

Le choix dichotomique à bornes multiples a été choisi pour le questionnaire, car il permet de déterminer directement la VDP des individus. De plus, il rend possible l'évaluation de leur niveau d'incertitude, celui-ci étant délimité par les réponses de type « peut-être ». Tel que proposé par Carson [2000] pour les sondages utilisant l'évaluation des contingences, le questionnaire soumis aux répondants (disponible à l'annexe E) contient cinq principales sections: (1) la mise en contexte; (2) la description des biens et services environnementaux visés; (3) la présentation du contexte institutionnel; (4) l'évaluation des contingences; (5) les caractéristiques du ménage.

Les données ont été recueillies en novembre et décembre 2008 à l'aide d'un questionnaire administré en personne par le candidat au doctorat ainsi qu'un auxiliaire de recherche. Cette

méthode a été retenue, car les participants étaient situés sur un territoire restreint et bien délimité. De plus, des supports visuels (cartes, schémas, photos, etc.) étaient nécessaires pour faciliter la compréhension des questions. Le sondage a été réalisé par un seul interviewer, à l'exception des premières journées où celui-ci était accompagné du concepteur du questionnaire. Les participants ne pouvant répondre au questionnaire en personne se sont vu offrir la possibilité d'y répondre en ligne, dans un format identique.

La population visée par le sondage est constituée de tous les ménages desservis par le SMEAU de Deauville, soit environ 1580 ménages. Les participants ont été choisis par échantillonnage stratifié aléatoire. Deux strates ont été identifiées, la première comprenant les ménages qui bénéficient d'un accès direct au lac ou à la rivière Magog et la seconde comprenant les ménages qui ne bénéficient pas d'un tel accès. Environ 590 ménages ont un accès au lac ou à la rivière et 990 n'y ont pas d'accès. Les participants ont ensuite été choisis de façon aléatoire parmi la liste des adresses des ménages desservis. L'échantillon initial comprenait 300 ménages, soit 140 ayant accès au lac ou à la rivière et 160 n'ayant pas accès. Bien qu'il soit difficile de déterminer une taille d'échantillon optimale de façon précise, il est suggéré de viser environ 300 participants quand la population est de l'ordre de quelques milliers, de manière à obtenir des résultats d'une précision raisonnable [Neumann, 1994]. Pour les sondages réalisés en personne, il est raisonnable de s'attendre à un taux de réponse de 80% [Blais et Durand, 2004]. Même avec un rappel téléphonique et l'option de répondre au questionnaire en ligne, le taux de réponse observé a toutefois été plus faible (35%). Les raisons de ce faible taux de réponse n'ont pas été investiguées, mais la longueur du questionnaire et son contenu technique sont des causes plausibles. Il a donc fallu procéder au sondage d'un second échantillon pour atteindre un total de 206 répondants.

Les questions visant à déterminer la valeur monétaire aux biens et services environnementaux protégés par le SMAEU étaient accompagnées de questions complémentaires permettant d'analyser les résultats obtenus. En premier lieu, les données socio-démographiques ont permis de confirmer la représentativité de l'échantillon. En second lieu, la corrélation de la VDP (ou du CAA) avec certaines variables clés a pu être comparée avec les tendances anticipées. Par exemple, la VDP est susceptible d'être corrélée positivement avec le revenu du répondant, son niveau d'éducation, sa sensibilité environnementale, son usage des plans d'eau, etc.

Analyse distributionnelle

Selon la WEF [2004], le financement équitable des services d'assainissement des eaux usées repose sur la distribution des coûts entre les différentes classes de clients selon le niveau de service requis par chacune de ces classes. Pour réaliser une telle évaluation, les clients doivent être catégorisés en usagers de type résidentiel, commercial ou industriel. Le niveau de service exigé par chacune de ces classes peut ensuite être caractérisé à l'aide de nombreux facteurs tels le volume moyen rejeté par jour, le débit de pointe imposé au réseau et la charge rejetée pour certains contaminants. Une fois les coûts globaux distribués entre les principales classes de clients, ceux-ci peuvent également être distribués à l'intérieur des classes selon les mêmes facteurs. Cette approche a notamment été utilisée à la Ville de San Diego [Raftelis Financial Consultants, 2006]. Toutefois, l'approche des coûts de service n'était pas envisageable pour évaluer l'équité du financement du SMAEU à l'étude. En effet, le SMAEU dessert en grande majorité des clients appartenant à la classe résidentielle et le niveau de service des clients dépend essentiellement du volume d'eaux usées rejeté alors que celui-ci n'est pas mesuré.

De manière implicite, l'approche des coûts de service fait appel au principe du bénéfice, selon lequel la contribution doit être proportionnelle au bénéfice retiré par l'utilisateur d'un service. Tel qu'abordé à la section 2.1, le cadre propre au développement durable n'implique pas nécessairement une telle interprétation du terme équité. Celle-ci a donc plutôt été abordée sous l'angle de l'accessibilité et de la répartition du fardeau financier entre les ménages. Les seuils d'accessibilité pour le financement des services d'assainissement des eaux usées sont typiquement fixés entre 1,5% et 2,5% du revenu médian observé dans la communauté [WEF, 2004]. Bien que ces seuils n'aient pas été fixés dans le but d'évaluer l'accessibilité des services pour les ménages sur une base individuelle, il est raisonnable de croire qu'un dépassement excessif de tels seuils soit problématique.

Le niveau d'inégalité existant dans une population est mesurable numériquement à l'aide d'indices, tels les indices de Gini et d'Atkinson. Toutefois, il est plus simple de représenter graphiquement les inégalités existant entre divers groupes de la population [Duclos et Araar, 2006]. Sans permettre une évaluation cardinale, cette approche permet néanmoins d'apprécier le niveau d'inégalité et de comparer sur une base ordinale l'effet distributif d'une gamme d'interventions par rapport à la distribution initiale. À titre d'exemple, la distribution du revenu disponible des ménages par quintile est fréquemment utilisée dans les statistiques

gouvernementales pour représenter le niveau d'inégalité existant dans la répartition de la richesse ainsi que son évolution au fil des années [Institut de la statistique du Québec, 2011]. La distribution par quintile a aussi été préférée aux indices de Gini et d'Atkinson, vu la faible taille de l'échantillon et de la population étudiée [Duclos et Araar, 2006].

L'évaluation du fardeau financier associé au financement du SMAEU à l'étude et sa répartition ont été réalisées en quatre principales étapes. Tout d'abord, l'estimation des coûts associés à la mise en place et à l'opération du système a été effectuée par l'ACCV. Ensuite, les modes de financement mis en place ainsi que leurs modalités ont été identifiés par la consultation des documents d'archive et de personnes ressources. La construction de la station d'épuration a été subventionnée en grande partie par le gouvernement provincial, donc financée indirectement par les impôts et taxes collectées auprès des ménages. Les coûts d'opération et d'entretien sont pour leur part assumés par la municipalité et financés par un tarif dédié inclus sur le compte de taxes municipales. Ensuite, la contribution en taxes et impôts a été estimée à partir du revenu de chaque ménage. Les caractéristiques des résidences (évaluation, étendue en front et superficie) ont pour leur part permis de calculer les taxes municipales payées. En dernier lieu, les ménages ont été classés en quintiles selon leur revenu et la contribution moyenne des ménages de chaque quintile a été calculée, de manière absolue en dollars puis de façon relative par rapport au revenu des ménages.

5.2.2 Étape 7 : Appliquer le PICDI au SMAEU de Deauville

Le PICDI défini à l'étape 4 et l'évaluation du SMAEU de Deauville dans sa configuration actuelle réalisée à l'étape 6 servent de base à la conception de sa modernisation. Les tâches réalisées sont basées sur la description faite du PICDI à la section 4.4 et sont énumérées au tableau 5.3. Autant les tâches conventionnelles que celles associées à la conception durable ont été réalisées. En effet, l'évaluation du volet technique des options considérées pour la modernisation du SMAEU était nécessaire pour confirmer la pertinence des solutions. Toutefois, l'accent a surtout été mis sur la composante originale de la recherche, soit les tâches composant le PICDI. Bien que la conception détaillée soit essentielle à la mise en œuvre de la solution recommandée, elle sert essentiellement à préciser les décisions prises lors de la conception préliminaire. En contrepartie, les choix affectant la contribution au développement durable d'un projet sont pour la plupart effectués lors de l'analyse conceptuelle et la conception préliminaire, car c'est à ce moment que sont générées, élaborées, puis évaluées les options. Par conséquent, la plupart des

tâches de la conception détaillée n'ont pas été effectuées dans le cadre de la thèse. La numérotation des tâches du PICDI effectuées est cohérente avec celle donnée au tableau 4.7.

Tableau 5.3 Application du PICDI au SMAEU de Deauville

Étape	Tâches conventionnelles	Tâches complémentaires associées au PICDI
I-Définition du problème	<ul style="list-style-type: none"> 1- Former l'équipe de conception 2- Définir le problème, les objectifs et le contexte 3- Identifier les contraintes et les données préliminaires 4- Planifier les étapes subséquentes 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Former une équipe multidisciplinaire 2- Définir les principes du développement durable 3- Définir un cadre conceptuel sur le développement durable 4- Identifier les enjeux associés au problème 5- Identifier les relations entre le projet et les composantes du cadre conceptuel 6- Analyser les parties prenantes
II-Analyse conceptuelle	<ul style="list-style-type: none"> 1- Analyse fonctionnelle 2- Génération de concepts 3- Identifier les spécifications d'après les fonctions et les autres exigences 	<ul style="list-style-type: none"> 7- Définir les critères associés aux enjeux 8- Valider les critères avec le cadre conceptuel 9- Envisager une situation future où les fonctions sont remplies en accord avec les principes du développement durable 10- Générer au moins un concept radicalement différent des solutions conventionnelles, inspiré des outils de pensée hétérodoxe. 12- Identifier des indicateurs de développement durable en lien avec les critères 13- Identifier les outils d'analyse utilisés pour évaluer les indicateurs 14- Identifier une méthode d'aide à la décision multicritère
III-Conception préliminaire	<ul style="list-style-type: none"> 1- Élaborer les concepts 2- Évaluer les concepts à l'aide des spécifications 3- Recommander un concept 	<ul style="list-style-type: none"> 15- Évaluer la performance des concepts à l'aide des critères et indicateurs, incluant une option conventionnelle servant de référence 16- Recommander un concept avec une méthode d'aide à la décision multicritère
IV-Conception détaillée	Non traité	22- Proposer une liste d'indicateurs de développement durable pour le suivi

Il faut mentionner que les options considérées ici ne correspondent pas nécessairement à celles qui seront envisagées par la Ville de Sherbrooke lors de la modernisation du système. En effet, la présente recherche a été complétée avant que la Ville n'octroie un mandat concernant la modernisation du SMAEU de Deauville. Ainsi, les hypothèses posées pour préciser le contexte du projet, bien que discutées avec les principaux intervenants, ne correspondent peut-être pas à celles qui seront retenues lors de la modernisation du SMAEU dans le futur. La réalisation de chacune des tâches, décrite aux sections 7.1 à 7.4, est abordée dans les paragraphes suivants.

Définition du problème

La première étape de la conception repose en partie sur des activités menées lors l'évaluation du système dans sa configuration existante (la définition du problème, des objectifs et du contexte; l'identification des contraintes et des données préliminaires ainsi que l'analyse des parties prenantes). Elle se base également sur les implications du développement durable pour le domaine de l'ingénierie (définition de principes; définition d'un cadre conceptuel et identification des enjeux propres au projet).

Analyse conceptuelle

En plus des tâches conventionnelles de conception (l'analyse fonctionnelle et l'identification des spécifications techniques), l'analyse conceptuelle fait intervenir un grand nombre de tâches complémentaires associées à la conception durable. La première d'entre elles requiert de tracer les contours d'une situation future où les fonctions du système à l'étude sont remplies en respectant les principes du développement durable. Cette activité sert principalement à fixer le niveau de performance que devrait atteindre une solution idéale. Suite à leur évaluation, les concepts proposés peuvent ainsi être comparés à cette solution « durable ».

La génération des concepts permettant de résoudre le problème identifié se situe au cœur de l'analyse conceptuelle et influence l'ensemble des tâches subséquentes dans le processus de conception. De manière à identifier le nombre le plus élevé possible de solutions, deux séances de créativité regroupant cinq personnes ont été organisées. L'utilisation des techniques de créativité ont été précédées d'une description du SMAEU de Deauville, d'une explication des problèmes actuels et anticipés, ainsi que d'un rappel des règles pour la pensée divergente. Des techniques de créativité conventionnelles ont été utilisées lors de la première séance (remue-ménages, jet d'idées sur papier et analogies), tandis que la seconde séance tablait sur un outil de pensée hétérodoxe inspiré du développement durable, soit l'extrapolation rétrospective.

Un nombre très élevé de concepts, soit plus d'une centaine, a été généré lors des séances de créativité. Pour faciliter leur tri, ceux-ci ont tout d'abord été classés en quelques catégories et certains concepts semblables ont pu être combinés pour obtenir une liste de 62 concepts. Parmi ces concepts, 25 portaient sur la gestion du SMAEU ou sur la sensibilisation des citoyens et pouvaient être mises en œuvre peu importe les solutions techniques retenues. Dans les options restantes, celles qui n'étaient pas compatibles avec les caractéristiques du système à l'étude ont

été éliminées pour les raisons énumérées à l'annexe N. Il résulte de ce tri préliminaire un nombre restreint d'options, qui sont néanmoins suffisamment différentes les unes des autres et dont la conception requiert un effort raisonnable vu le contexte du présent projet de recherche. Ainsi, deux solutions pour le réseau de collecte et trois solutions pour la station d'épuration ont été retenues pour l'étape de conception préliminaire. Les critères, indicateurs et outils retenus pour l'évaluation des concepts selon les volets technique et du développement durable (tableau 5.4) affichent certaines similarités avec ceux utilisés pour l'étude de la configuration existante.

Tableau 5.4 Critères et outils (technique et développement durable)

Volet	Critère	Spécification	Outil
Technique	Performance de la station	Respect des exigences à l'effluent	Modélisation de la station
	Performance du réseau	Respect des exigences aux ouvrages de surverse	Modélisation des débits dans le réseau
	Fiabilité de la station et du réseau	Risque de bris	Consultation des experts
		Risque de non-respect des exigences en cas de bris	
	Robustesse de la station et du réseau	Capacité à accommoder des conditions variables	
Flexibilité de la station et du réseau	Facilité à modifier les installations		
Environnement	Utilisation des ressources	Utilisation des ressources non renouvelables	AECV
	Impact sur les écosystèmes	Impact potentiel sur la biodiversité	
	Impact sur la santé humaine	Impact potentiel sur la santé humaine	
Économie	Coûts de conception et de construction	Coûts estimés pour la conception et la construction	ACCV
	Coûts d'opération et d'entretien	Coûts projetés pour l'opération et d'entretien	
	Coûts en fin de vie	Coûts estimés pour la fin de vie	
	Volonté de payer	Rapport entre les coûts engagés et la volonté de payer	ACCV et sondage auprès des citoyens
Société	Développement professionnel	Développement des compétences des employés	Consultation des experts
	Nuisances	Atteinte au bien-être ou à la santé des individus	
	Comportements responsables	Influence sur les comportements des citoyens	Consultation des parties prenantes
	Acceptabilité	Volonté d'adopter ou d'appuyer les solutions	
	Équité	Traitement des individus selon leurs conditions particulières	

La comparaison des critères et outils utilisés pour l'évaluation du SMAEU existant avec ceux retenus pour l'évaluation des options fait ressortir quelques différences. En premier lieu, un système existant peut être scruté selon certains aspects qu'il n'est pas possible d'évaluer pour des solutions potentielles, par exemple le niveau de satisfaction. Toutefois, d'autres critères, tels l'acceptabilité, s'avèrent plus pertinents pour des interventions à venir que des mesures implantées dans le passé. La démarche ayant mené au choix des critères, indicateurs et outils du développement durable fait partie intégrante du PICDI et est détaillée aux sections 7.1 et 7.2.

Conception préliminaire

Les concepts générés lors de l'analyse conceptuelle ont été dimensionnés à l'aide des spécifications et autres caractéristiques des technologies envisagées. Ces informations ont été tirées de la littérature ou ont été obtenues par l'intermédiaire de fournisseurs. La configuration des solutions a été détaillée jusqu'à un niveau permettant leur évaluation selon l'ensemble des critères et indicateurs préalablement identifiés.

La méthodologie utilisée pour la modélisation de station et du réseau est sensiblement la même que celle utilisée pour l'évaluation du SMAEU existant. L'évaluation de certains concepts selon le volet technique a nécessité des itérations, car des modifications ont dû être apportées pour assurer le respect des exigences. L'évaluation technique des options est également basée sur la consultation d'experts œuvrant dans le domaine de l'assainissement des eaux usées. Un panel d'experts a été constitué pour simuler une équipe de conception devant statuer sur la performance des options à l'étude. Le nombre de personnes sollicitées pour participer à l'étude s'élevait à 15 et neuf d'entre elles ont accepté. Le panel d'experts est composé de :

- Deux professionnels de la Ville de Sherbrooke (un ingénieur et un technicien).
- Deux professionnels d'autres municipalités situées à l'extérieur de la région de Sherbrooke.
- Un ingénieur responsable de l'assainissement des eaux usées au MDDEP.
- Deux ingénieurs œuvrant en génie-conseil dans la région de Sherbrooke.
- Deux ingénieurs œuvrant en génie-conseil ailleurs à l'extérieur de la région de Sherbrooke.

Les experts ont été choisis pour représenter la diversité des intervenants impliqués dans la conception des SMAEU. La taille du panel est cohérente avec l'objectif premier de la démarche, c'est-à-dire procéder à l'analyse préliminaire conformément aux pratiques proposées dans le domaine de la conception. Le questionnaire transmis aux experts était structuré en six

principales sections : (1) la mise en contexte, (2) la description de la problématique et la présentation des options envisagées, (3) la présentation de la méthode d'évaluation et des critères, (4) l'évaluation des options, (5) l'évaluation de l'importance des critères et (6) les questions sur le profil du répondant. Le questionnaire est disponible à l'annexe F.

L'évaluation portait à la fois sur le réseau de collecte et sur la station d'épuration. Des critères de nature sociale (nuisances et développement des compétences) ont aussi été intégrés à la consultation des experts. Chaque critère était évalué sur une échelle à intervalle, une approche appropriée pour la conception préliminaire où plusieurs options sont considérées de manière simultanée dans un contexte d'information incertaine et limitée [Otto et Wood, 2001]. L'échelle à intervalle retenue pour évaluer la performance des options est une échelle à cinq niveaux de type Likert (tableau 5.5), compatible avec les teintes de durabilité identifiées dans le PICDI.

Tableau 5.5 Échelle pour l'évaluation de la performance des solutions

0	1	2	3	4
Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale

Comme les experts consultés possédaient des formations et des expériences variées, il est apparu important d'évaluer le niveau de confiance accordé à leurs évaluations. Pour chaque critère et chaque option, ceux-ci devaient donc qualifier cette confiance selon une échelle à trois niveaux (élevée, moyenne ou faible). Ceci a par la suite permis d'accorder une importance plus grande aux évaluations caractérisées par un meilleur niveau de confiance lors de la synthèse des résultats. Ceci a également facilité l'identification des solutions moins bien connues par les experts. Suite à l'évaluation des options, les experts étaient amenés à statuer sur l'importance des critères selon une échelle de Likert à quatre niveaux et à classer ces critères en ordre de priorité. En dernier lieu, des questions sur le profil professionnel des experts étaient posées.

L'évaluation des critères environnementaux a été réalisée à l'aide de l'AECV et de l'ACCV selon le même cadre que celui décrit à la section 5.2.2 pour l'évaluation du système existant. Les particularités des analyses menées sont expliquées à la section 7.3.3. Des parties prenantes ont également été consultées pour l'évaluation d'aspects sociaux spécifiques. Des 12 participants identifiés à prime abord, neuf ont accepté de répondre au questionnaire :

- Deux professionnels de la Ville de Sherbrooke (un ingénieur et un technicien).
- Deux conseillers municipaux à la Ville de Sherbrooke.

- Deux professionnels œuvrant dans les organismes environnementaux de Sherbrooke.
- Trois citoyens siégeant sur des comités de la Ville de Sherbrooke.

Les participants ont été choisis pour représenter les parties prenantes primaires concernées par le projet de modernisation du SMAEU. Plusieurs raisons ont motivé l'usage d'un petit échantillon. Tout d'abord, vu l'ampleur restreinte du projet, un nombre limité de parties prenantes (professionnels, conseillers municipaux, organismes environnementaux, citoyens, etc.) sont directement touchés ou susceptibles d'y porter un intérêt suffisant. Ensuite, comme la réalisation du projet, ainsi que la forme que celui-ci prendra, est encore incertaine, une consultation élargie n'était pas envisageable. De plus, la mise en place d'un processus de consultation plus imposant auprès des parties prenantes et des citoyens aurait nécessité une implication accrue de la Ville de Sherbrooke. L'évaluation des critères par les parties prenantes sur une échelle à intervalle permet tout de même de répondre à l'objectif visé lors de la conception préliminaire, c'est-à-dire de mettre en évidence les facteurs permettant de distinguer clairement les options les unes des autres. La structure du questionnaire transmis aux parties prenantes est identique à celle du questionnaire transmis au panel d'experts. Les échelles pour l'évaluation des options, l'évaluation du niveau de confiance du participant envers ses réponses et l'évaluation de l'importance des critères sont aussi les mêmes. Les critères inclus dans l'évaluation étaient toutefois différents et portaient sur les comportements responsables, l'acceptabilité et l'équité.

L'évaluation des options selon chacun des critères était précédée de questions préliminaires visant à mieux saisir l'interprétation que les parties prenantes avaient de ces critères. Les participants devaient premièrement se prononcer sur la force du lien qui existait entre les technologies employées pour le réseau de collecte ou la station d'épuration et les aspects considérés dans l'étude. L'évaluation était réalisée selon chaque critère seulement si le participant croyait que la performance du système selon le critère en question était influencée par les technologies mises en place. Par exemple, les participants ont été interrogés sur la capacité des options envisagées à favoriser l'adoption de comportements responsables seulement s'ils se déclaraient en accord avec l'énoncé selon lequel la technologie retenue était susceptible d'influencer l'adoption de comportements responsables. Pour les critères de l'acceptabilité et de l'équité, les participants étaient aussi amenés à se prononcer sur une liste de facteurs susceptibles d'influencer l'acceptabilité du projet ou son caractère équitable. Ces questions étaient posées dans le but de faciliter l'interprétation des résultats ainsi que pour

identifier si des interprétations faisant consensus sur des concepts aussi complexes que l'acceptabilité ou l'équité étaient observées chez les parties prenantes.

La dernière tâche de la conception préliminaire consiste à recommander un concept à l'aide d'une méthode d'aide à la décision multicritère. La pertinence de plusieurs de ces méthodes dans une démarche d'évaluation de la durabilité a été mise en évidence à la section 2.3.3. Parmi les approches recensées, la méthode SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*) a été adaptée pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus sur les options considérées pour la modernisation du SMAEU de Deauville. La méthode SMART est préférée aux autres méthodes recensées, car elle permet de positionner les options par rapport aux teintes de durabilité. En effet, les approches basées sur le surclassement ou la méthode AHP permettent plutôt de classer les options en ordre de préférence les unes par rapport aux autres. Cette caractéristique découle de l'utilisation d'une fonction linéaire situant la performance des options entre un niveau minimal et idéal pour chaque critère. Cette particularité différencie également la méthode SMART de la méthode TOPSIS, car dans cette dernière l'option idéale est construite à partir des performances maximales observées selon chaque critère. Ainsi, cette technique n'est pas compatible avec l'utilisation de teintes fixées indépendamment des options. La structure d'ensemble de la méthode SMART est similaire à celles des autres méthodes d'aide à la décision multicritère et comprend sept principales étapes [Edwards et Newman, 1982]. Ces étapes ainsi que leurs adaptations sont décrites au tableau 5.6.

Les adaptations à la méthode SMART sont nécessaires pour permettre son application dans le présent projet. À prime abord, l'identification des critères (ou attributs) est basée sur un cadre de référence propre au développement durable, comme dans toutes les évaluations du même genre recensées dans la revue de littérature (sections 2.6.3 et 2.6.4). Ce type d'évaluation est différent de celles prévues initialement par Edwards et Newman [1982] pour lesquelles une liste d'attributs pouvait être déduite des préoccupations des parties prenantes. Dans l'éventualité où un processus de conception participatif était mené par la Ville de Sherbrooke, il serait envisageable d'élaborer une hiérarchie d'attributs à la fois cohérente avec le cadre théorique du développement durable et conforme aux attentes des parties prenantes. Une telle démarche, très peu courante, nécessite toutefois une volonté politique et la planification d'activités nécessitant des ressources, autant à l'interne de l'organisation qu'à l'externe.

Tableau 5.6 Description des étapes de la méthode SMART

Étape	Description	Adaptation
Identification des objectifs de l'étude et des options	Définir si l'étude est menée à des fins comparatives ou pour effectuer le suivi d'un projet existant. Définir la gamme d'options répondant au problème.	Aucune
Identification des parties prenantes	Identifier les personnes ou les organisations qui seront affectées.	Aucune
Identification et organisation des attributs	Obtenir des parties prenantes les attributs pertinents et organiser ceux-ci selon une structure hiérarchique.	Les attributs et la structure hiérarchique découlent du cadre théorique propre au développement durable et de la revue de littérature sur l'évaluation des SMAEU.
Évaluation de l'importance des attributs	Consulter les parties prenantes, ou leurs représentants, pour établir l'importance relative des attributs.	Les outils retenus pour les critères économiques et environnementaux et fixent leur importance.
Évaluation des options selon les critères	Évaluer l'utilité des options selon chacun des critères à l'aide de mesures ou de jugement expert. Retenir une échelle commune pour permettre l'agrégation.	L'évaluation technique et sociale repose sur le jugement expert. L'ACCV et l'AECV sert respectivement pour les dimensions économique et environnementale.
Agrégation des évaluations	La performance globale ou par thème est obtenue à partir de la performance selon chaque critère.	La performance des options est agrégée au niveau des dimensions plutôt qu'à un niveau global.
Analyse de sensibilité	La robustesse des résultats est testée en faisant varier la performance des options ou l'importance relative des attributs.	Aucune.

L'évaluation de l'importance relative des attributs (la pondération des critères) est pour sa part effectuée dimension par dimension. L'utilité (ou performance) selon les dimensions est calculée à l'aide de l'équation 7.1 [Edwards et Newman, 1982].

$$U_j = \sum_{i=1}^n w_i u_{ij} \quad (5.1)$$

Où :

U_j : utilité globale pour l'option j

n : nombre d'indicateurs pour la dimension évaluée

w_i : pondération de la spécification ou de l'indicateur i

u_{ij} : utilité de l'option j selon le critère i

L'utilité selon les indicateurs est fonction des évaluations réalisées pour chacun d'entre eux. L'équation 7.2 [Azapagic et Perdan, 2005b] permet d'exprimer l'utilité selon une échelle commune bien que les indicateurs aient été évalués selon des méthodes et des unités différentes.

$$u_{ij} = f_i(x_{ij}) \quad (5.2)$$

Où :

u_{ij} : utilité de l'option j selon le critère i

f_i : fonction propre au critère i

x_{ij} : performance de l'option j selon le critère i

Les fonctions liant l'utilité à la performance sont linéaires et définies de manière cohérente avec les teintes de durabilité prévues au PICDI. Le volet technique est évalué à l'aide de six spécifications, dont deux portent sur le respect des exigences à l'effluent et aux ouvrages de surverse. Le respect de ces dernières est obligatoire pour que les options soient retenues. Les quatre autres spécifications sont pour leur part pondérées et agrégées (facteurs au tableau 5.7).

L'équation 7.3 est suggérée pour calculer la pondération des spécifications selon l'importance leur étant accordée par les experts. Les poids sont normalisés pour que leur somme égale 1.

$$w_i = \bar{p}_i / \sum_{i=1}^n \bar{p}_i \quad (5.3)$$

Où :

w_i : pondération du critère i

\bar{p}_i : importance moyenne accordée au critère i par les experts

n : nombre d'indicateurs pour la dimension évaluée

Tableau 5.7 Pondérations et fonction linéaire pour les spécifications techniques

	Spécification	Pondération	Fonction
Réseau	Risque de bris	0,181	
	Risque de non-respect des exigences	0,181	
	Robustesse	0,329	
	Flexibilité	0,309	
Station	Risque de bris	0,174	
	Risque de non-respect des exigences	0,174	
	Robustesse	0,326	
	Flexibilité	0,326	

La fonction d'utilité linéaire permet pour sa part de convertir le jugement des experts, exprimé sur une échelle de 0 à 4, en un résultat exprimé sur une échelle de 0 à 1 relié aux teintes de durabilité. Pour les quatre volets considérés, la performance est convertie selon cette échelle de

0 à 1 pour faciliter les comparaisons. La performance technique des options est calculée selon deux approches différentes. La première attribue une importance égale au jugement de chaque expert, peu importe le niveau d'incertitude déclaré. Selon la seconde, les évaluations des experts affichant un faible niveau d'incertitude se voient attribuées une importance plus élevée que celles des experts exprimant un niveau d'incertitude moyen ou élevé. Cet ajustement est effectué en multipliant les évaluations par les facteurs d'ajustement du tableau 5.8. Ces facteurs sont accompagnés de l'incertitude fournie à titre indicatif dans le questionnaire.

Tableau 5.8 Facteurs d'ajustement pour l'incertitude

Niveau	Description	Incertitude	Facteur
Faible	L'évaluation est précise et se base, par exemple, sur une expérience concrète. Le niveau est choisi sans hésitation.	±0,0	1,333
Moyen	L'évaluation est approximative et se base, par exemple, sur des connaissances techniques. Il y a hésitation entre deux niveaux.	±0,5	1,000
Élevé	L'évaluation est très approximative et se base, par exemple, sur des connaissances générales. Il y a hésitation entre trois niveaux.	±1,0	0,667

Il est proposé de calculer la performance ajustée en fonction de l'incertitude avec l'équation 7.4.

$$x'_{ij} = a_{ijm} x_{ijm} / \sum_{i=1}^m a_{ijm} \quad (5.4)$$

Où :

x'_{ij} : performance ajustée pour l'option j selon le critère i

a_{ijm} : facteur d'ajustement de l'expert m pour l'option j selon le critère i

x_{ijm} : performance de l'option j selon le critère i d'après l'expert m

m : nombre d'experts

Selon les facteurs choisis, la réponse d'un expert affichant un niveau d'incertitude faible contribue deux fois plus au score total que celle d'un expert affichant un niveau d'incertitude élevé. Cet ajustement permet de tenir compte du niveau d'expertise variable d'un expert à l'autre pour chacune des technologies et spécifications considérées. Une analyse de sensibilité est effectuée pour vérifier l'influence des facteurs d'ajustement sur les résultats d'ensemble. La performance technique des options considérées pour le réseau de collecte est évaluée de manière distincte de celle des options pour la station d'épuration. Comme des interventions sont requises à la fois sur le réseau et la station, la performance technique des options combinées est calculée en attribuant une importance égale aux deux évaluations. En se basant sur l'évaluation

technique du SMAEU existant présentée à la section 6.3, il est en effet raisonnable de croire que la performance globale dépend autant du bon fonctionnement du réseau que de celui la station.

L'évaluation de la dimension environnementale est réalisée de manière similaire à celle décrite à la section 6.4.1 pour le SMAEU dans sa configuration actuelle. La méthode d'évaluation des impacts choisie, soit ReCiPe, comprend 16 catégories d'impact intermédiaires regroupées en trois catégories de dommages. Ces catégories de dommages peuvent être agrégées en un indicateur unique selon la pondération proposée par Goedkoop *et al.* [2009] (tableau 5.9). La fonction d'utilité linéaire est basée sur la comparaison avec le SMAEU dans sa configuration actuelle. Le rapport entre l'impact environnemental des options envisagées et celui du SMAEU existant est ainsi calculé. Plus le niveau de réduction des impacts est élevé, plus l'utilité et la teinte de durabilité atteinte le sont également. La performance conventionnelle est égale à l'impact environnemental du SMAEU existant tandis que la situation durable correspond à ce même impact réduit d'un facteur cinq.

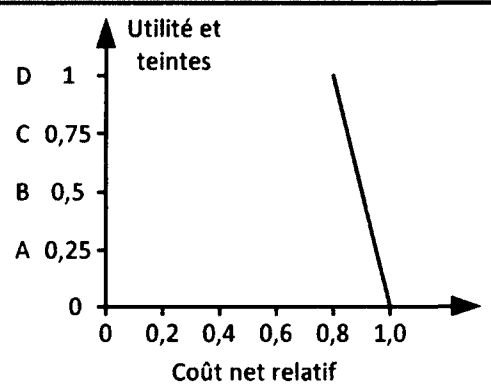
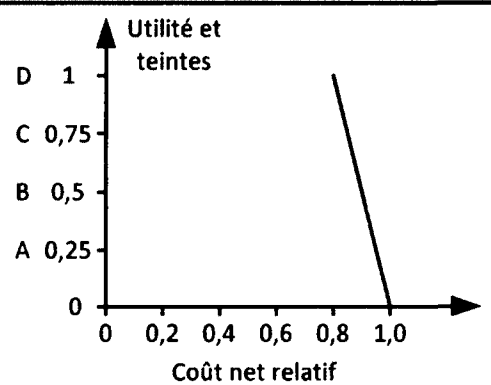
Tableau 5.9 Pondérations et fonction pour les indicateurs environnementaux

Catégories de dommage	Pondération	Fonction
Impact sur la santé humaine	0,4	
Impact sur les écosystèmes	0,4	
Consommation des ressources	0,2	

Les indicateurs économiques sont en grande partie basés sur l'évaluation des coûts sur le cycle de vie. Ceux-ci sont agrégés lors de l'actualisation en une valeur présente nette exprimée en dollars constants. L'indicateur portant sur la volonté de payer est pour sa part de type « seuil », la valeur plafond devant être respectée. La fonction d'utilité linéaire donnée au tableau 5.10 pour les coûts est semblable à celle retenue pour le volet environnemental. Le niveau d'utilité est calculé de manière relative aux coûts sur le cycle de vie estimés pour le SMAEU existant. La performance conventionnelle correspond donc à un coût par personne égal à celui du SMAEU dans sa configuration existante. Idéalement, les bénéfices obtenus par l'exploitation des ressources présentes dans les eaux usées sont en mesure de couvrir une partie importante des

coûts engagés sur le cycle de vie. Le coût minimal est donc obtenu en incluant de tels bénéfices dans l'analyse des coûts sur le cycle de vie de l'option la moins coûteuse.

Tableau 5.10 Pondérations et fonction pour les indicateurs économiques

	Coûts	Actualisation	Fonction	
Réseau	Coûts estimés pour la conception et la construction	4,5% sur la période 2009-2064		
	Coûts projetés pour l'opération et l'entretien			
	Coûts estimés pour la fin de vie			
Station	Coûts estimés pour la conception et la construction	4,5% sur la période 2009-2064		
	Coûts projetés pour l'opération et l'entretien			
	Coûts estimés pour la fin de vie			

L'évaluation sommaire des bénéfices associés à la valorisation de l'énergie et des nutriments présents dans les eaux usées est décrite à la section 7.3.2. L'objectif visé n'est pas d'estimer les coûts et les bénéfices associés à la modification du système existant pour permettre la valorisation de ces ressources. L'exercice est plutôt mené pour évaluer les coûts nets d'un SMAEU conçu dans une telle perspective. La valeur ainsi obtenue sert uniquement à comparer des options envisagées selon les teintes de durabilité.

L'agrégation des indicateurs sociaux se fait selon la même démarche que celle présentée pour les spécifications techniques. Les indicateurs sociaux découlant de facteurs techniques (nuisances et développement des compétences) ont été évalués par les experts tandis que les autres l'ont été par les parties prenantes. Comme expliqué à la section 5.2.2, l'évaluation des indicateurs était réalisée seulement si les participants considéraient que la performance était influencée par les technologies considérées. Pour la station d'épuration, la majorité des répondants a déclaré que le choix n'aurait pas d'influence sur l'adoption de comportements responsables ou sur l'équité. Ces indicateurs n'ont donc pas été inclus dans le calcul de la performance globale. En ce qui concerne le réseau de collecte, la plupart des parties prenantes ont considéré que le choix avait une influence notable pour tous les indicateurs. La pondération pour les indicateurs retenus ainsi que la fonction d'utilité linéaire associée sont données au tableau 5.11. La fonction d'utilité pour le volet social est identique à celle pour le volet technique, tout comme l'approche servant à pondérer les indicateurs et à ajuster les performances selon l'incertitude (équations 7.2 et 7.3).

Tableau 5.11 Pondérations et fonction pour les indicateurs sociaux

	Indicateur	Pondération	Fonction
Réseau	Nuisances	0,224	
	Développement des compétences	0,135	
	Comportements responsables	0,227	
	Acceptabilité	0,219	
	Équité	0,195	
Station	Nuisances	0,374	
	Développement des compétences	0,246	
	Acceptabilité	0,379	

Comme les critères à l'intérieur d'une même dimension sont de même nature et sont habituellement évalués à l'aide d'un seul outil d'analyse, l'évaluation de leur importance relative est moins problématique que la pondération des dimensions elles-mêmes. L'attribution d'une importance différente aux dimensions du développement durable et les questions sous-jacentes de comparabilité et de substituabilité sont au cœur même du débat entre durabilité faible et durabilité forte (section 2.1.2). Ainsi, l'agrégation des résultats obtenus pour chaque volet en un indice unique est un sujet délicat. Plusieurs raisons justifient la présentation des valeurs obtenus sur une base distincte pour chaque volet [CERTU, 2006; ISO, 2006a; Munda, 2005; Neumayer, 2003; Villeneuve, 2007]. Ceci permet de divulguer les résultats avec une plus grande transparence, de poser explicitement la question de la compensation entre les volets du développement durable et de fixer des valeurs seuils minimales selon chaque volet pour guider la prise de décision. D'autre part, l'agrégation des valeurs obtenues pour chacun des volets en un indice unique est fréquemment utilisée en pratique, car elle peut faciliter la prise de décision.

Si le calcul d'un indice de performance unique est souhaité, certaines précautions doivent toutefois être prises. Ainsi, les préférences du ou des décideurs doivent être divulguées de manière transparente. Le résultat selon l'indice unique doit aussi être accompagné des résultats pour chacun des critères et dimensions. Par exemple, l'indice unique doit être accompagné des valeurs par volet pour permettre aux parties intéressées de constater l'effet de différentes pondérations sur les résultats finaux [ISO, 2006a]. Le triangle de mélange (*mixing triangle*) proposé par Hofstetter *et al.* [1999] est un outil visuel utile à cet effet. Il est également important d'identifier comment les poids des critères et des volets ont été définis, par exemple quelles parties prenantes ont été consultées [Edwards et Newman, 1982].

Comme le cadre théorique construit autour du concept de développement durable suppose un équilibre entre ses dimensions, l'évaluation de la durabilité se distingue des autres situations traitées dans le domaine de l'aide à la décision multicritère. Un tel équilibre peut être assuré en prévoyant des valeurs minimale et maximale pour la pondération de chaque volet. La question de la comparabilité entre les volets peut aussi être traitée par l'utilisation de méthodes basées sur le surclassement (section 2.3.3). En effet, leur structure limite la compensation entre les critères et les volets. Pour les projets d'ingénierie, le volet technique est difficile à comparer aux autres volets, car il se situe hors de la représentation du développement durable. Les critères de nature technique sont néanmoins sujets aux compromis, surtout s'ils mettent en évidence des lacunes susceptibles d'avoir des répercussions sur les volets du développement durable. Différentes approches à la prise de décision, inspirées de teintes de durabilité, sont abordées à la section 7.3.

5.2.3 Étape 8 : Évaluer la mise en œuvre du PICDI

L'évaluation de la mise en œuvre du PICDI pour la modernisation du SMAEU de Deauville a reposé sur les six dimensions de la conception durable relevées à la section 4.5 : (1) la structure du processus de conception; (2) la gamme d'enjeux relatifs au développement durable considérés; (3) la pertinence des indicateurs retenus; (4) la précision des outils utilisés pour l'évaluation des indicateurs; (5) la performance des options considérées par rapport aux solutions conventionnelles. (6) la prise de décision. En référence à la section 4.6, il s'agit ici d'une auto-évaluation et non d'une évaluation externe. Pour chacune des dimensions, quatre teintes générales sont définies au tableau 5.12 pour se comparer avec la conception conventionnelle.

Tableau 5.12 Teintes pour l'application du PICDI

-	A	B	C	D
Conventionnel	Minimale	Acceptable	Élevée	Idéale

Dans le tableau 4.9, les quatre teintes ont été exposées en détail pour chacune des dimensions. Leur utilisation dans le cadre du projet de modernisation du SMAEU de Deauville est illustrée à la section 7.5. Les dimensions ont ensuite fait l'objet d'une discussion visant à mettre en évidence les freins et les leviers à la mise en œuvre du PICDI. Tel que mentionné aux sections 5.2.1 et 5.2.2, l'analyse du SMAEU de Deauville dans sa configuration existante et l'application du PICDI à sa modernisation comportent plusieurs subtilités qui ne peuvent être approfondies dans la méthodologie. Ces détails, exposés aux chapitres 6 et 7, permettent de mieux saisir l'originalité et l'ampleur des travaux de recherche.

Chapitre 6 ANALYSE DU SMAEU DE DEAUVILLE

La synthèse des travaux menés sur le système municipal d'assainissement des eaux usées (SMAEU) de Deauville dans sa configuration actuelle est présentée au chapitre 6. Un portrait complet du SMAEU est donné, autant selon le volet technique que selon les trois dimensions du développement durable. Cette évaluation est préalable à l'application du PICDI pour la modernisation du SMAEU de Deauville au chapitre 7. Le contexte québécois et canadien propre au domaine de l'assainissement est tout d'abord présenté, suivi d'une brève description de la mise en place ainsi que du fonctionnement du SMAEU. Viennent ensuite les analyses techniques et de durabilité, dont la réalisation se base sur les critères et outils décrits à la section 5.2.1.

6.1 Contexte québécois et canadien

Au Québec, un très grand nombre de SMAEU ont été implantés dans le cadre du Programme d'assainissement des eaux du Québec (PAEQ), entre 1978 et 1993, puis du Programme d'assainissement des eaux municipales (PADEM), entre 1994 à 1999. Ces programmes provinciaux, chapeautés par la Société québécoise d'assainissement des eaux (SQAE), ont permis de financer la construction de réseaux de collecte et de stations d'épuration. En 1999, 98% de la population québécoise raccordée à un réseau d'égout voyait ses eaux usées traitées comparativement à moins de 2% à la fin des années 1970 [MENV, 2002]. Dans plusieurs provinces canadiennes (Ontario et Prairies), une grande partie de ces infrastructures ont été construites au cours des années 1960 et 1970. Toutefois, une forte proportion de la population des Maritimes voyait ses eaux usées rejetées sans aucun traitement au début des années 2000 [Environnement Canada, 2001]. Les technologies employées pour l'épuration des eaux usées au Québec sont énumérées au tableau 6.1 [MAMROT, 2010].

Tableau 6.1 Types de station d'épuration en opération au Québec en 2009

Type de station	Stations (nombre et %)		Débit traité (m ³ /d et %)	
Boues activées	47	6,4%	752 456	11,4%
Disques biologiques	19	2,6%	9528	0,1%
Biofiltration	8	1,1%	641 100	9,7%
Dégrillage fin	26	3,5%	35 817	0,5%
Étangs aérés	502	67,8%	1 499 827	22,7%
Étangs à rétention réduite	48	3,9%	35 723	0,4%
Étangs non aérés	38	5,1%	11 216	0,2%
Physico-chimique	13	1,8%	3 623 644	54,8%
Divers	39	5,3%	3571	0,1%
Total	740	100%	6 612 883	100%

Les étangs aérés sont présents en grand nombre au Québec, car il s'agit d'une technologie utilisée par la majorité des communautés de moins de 10 000 habitants (débit inférieur à 5000 m³/d). Comme ils ont habituellement une petite capacité, ils ne traitent que 23% du débit québécois total. Le type de station physico-chimique est celui traitant la plus grande partie du débit au Québec malgré le faible nombre de stations. Ceci est dû au fait que les villes de Montréal, Longueuil et Laval (trois des plus grandes agglomérations québécoises) exploitent ce type de station. Les stations de type boues activées et biofiltration, se retrouvant dans quelques agglomérations de moyenne taille, traitent aussi une portion non négligeable du débit total.

Le niveau de traitement des eaux usées au Canada varie beaucoup d'une province à l'autre. En 2006, environ 95% de la population de l'Ontario, du Manitoba, de la Saskatchewan et de l'Alberta pouvait bénéficier d'un traitement secondaire tandis que ce niveau était de 64% en Colombie-Britannique et de 50% au Québec [Environnement Canada, 2010a]. Les disparités régionales, autant en ce qui concerne le rendement des stations d'épuration que la réglementation, sont à l'origine de la *Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales* [CCME, 2009]. Cette stratégie, adoptée en 2009, s'accompagne d'un projet de règlement sur l'exploitation des systèmes d'assainissement des eaux usées. Le projet de règlement propose des normes de performance nationales pour quelques paramètres: la demande biochimique en oxygène carbonée après 5 jours (DBO₅C), les matières en suspension (MES), la fraction non ionisée de l'azote ammoniacal (NH₃) et le chlore résiduel total (CRT). La stratégie pose également un cadre de gestion du risque qui permet d'établir des objectifs environnementaux de rejet (OER) propres à chaque site pour d'autres contaminants en complément des normes nationales. Notons que l'absence de toxicité aiguë à l'effluent et de toxicité chronique dans le milieu récepteur font partie des OER. Finalement, la stratégie prévoit que les débordements d'égouts unitaires et domestiques en temps sec devront être éliminés. En 2011, le Québec, le Nunavut et Terre-Neuve-et-Labrador n'ont pas encore ratifié la stratégie pancanadienne.

6.2 SMAEU de Deauville

Le SMAEU à l'étude couvre des secteurs situés en périphérie des villes de Sherbrooke et Magog (figure 6.1). Le territoire borde la rivière Magog et le lac Magog. Le réseau de collecte se subdivise en 18 sous-bassins et mobilise trois technologies différentes (gravitaire avec postes de pompage, sous vide et basse pression). Des 18 sous-bassins, 16 sont situés sur le territoire de Sherbrooke et deux sur celui de Magog. Les secteurs desservis sont principalement à vocation

résidentielle, mais on y retrouve aussi quelques industries, commerces et institutions (ICI). La station d'épuration est de type étangs aérés facultatifs et son émissaire est situé dans la rivière Magog.

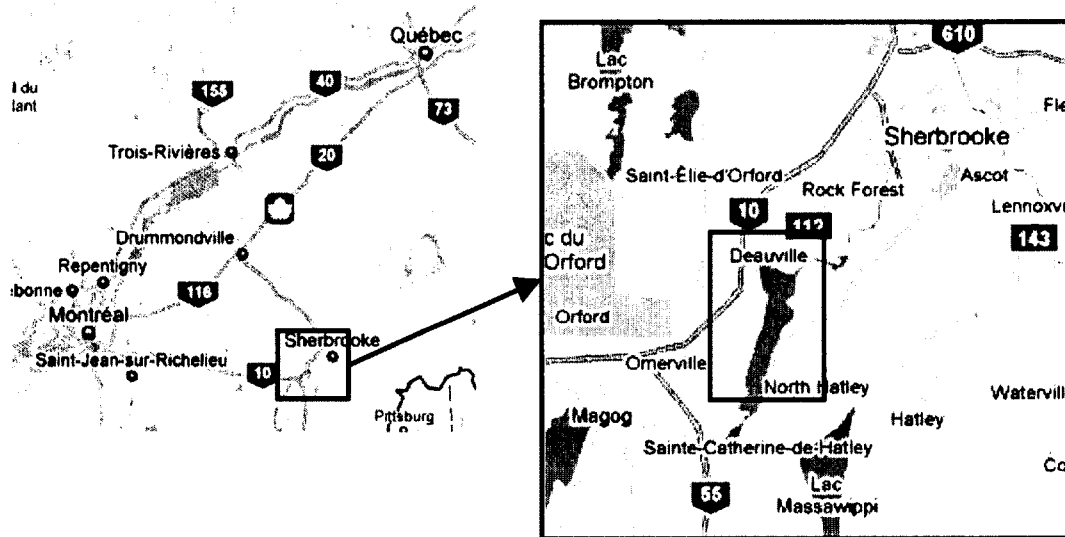


Figure 6.1 Emplacement du SMAEU à l'étude [Source : Google Maps]

Alors que la première portion du SMAEU est construite en 1979 sur le territoire de la municipalité de Deauville, les interventions visant l'amélioration de la qualité de l'eau dans le lac Magog et la rivière Magog sont discutées depuis les années 1960. La portion du réseau de collecte datant de 1979 est gravitaire et compte cinq postes de pompage pour effectuer le refoulement des eaux usées vers la station d'épuration. Le territoire desservi correspond au centre de l'ancienne municipalité de Deauville et est situé en périphérie de la portion nord du lac Magog. Les sous-bassins G, GA et GB du réseau actuel (figure 6.2) couvrent la majeure partie de cette portion du réseau. La station d'épuration mise en place en 1979 est une unité préfabriquée de type boues activées.

En 1989, le réseau de collecte est étendu à une plus grande partie des rives du lac Magog et de la rivière Magog. La seconde portion du SMAEU couvre certains secteurs de la ville de Rock Forest et du canton de Magog. Les travaux réalisés en 1989 s'inscrivent dans le cadre du PAEQ. Environ 1700 personnes équivalentes sont desservies avant les travaux de 1989 et l'agrandissement du réseau de collecte des eaux usées fait passer ce chiffre à près de 3500. Le réseau de collecte des eaux usées se voit adjoindre 10 sous-bassins additionnels (A, B, C, D, E, F, H, I, J et K). La station d'épuration de type boues activées, dont la capacité est insuffisante, est remplacée par une station de type étangs aérés facultatifs. L'emplacement de la station demeure le même.

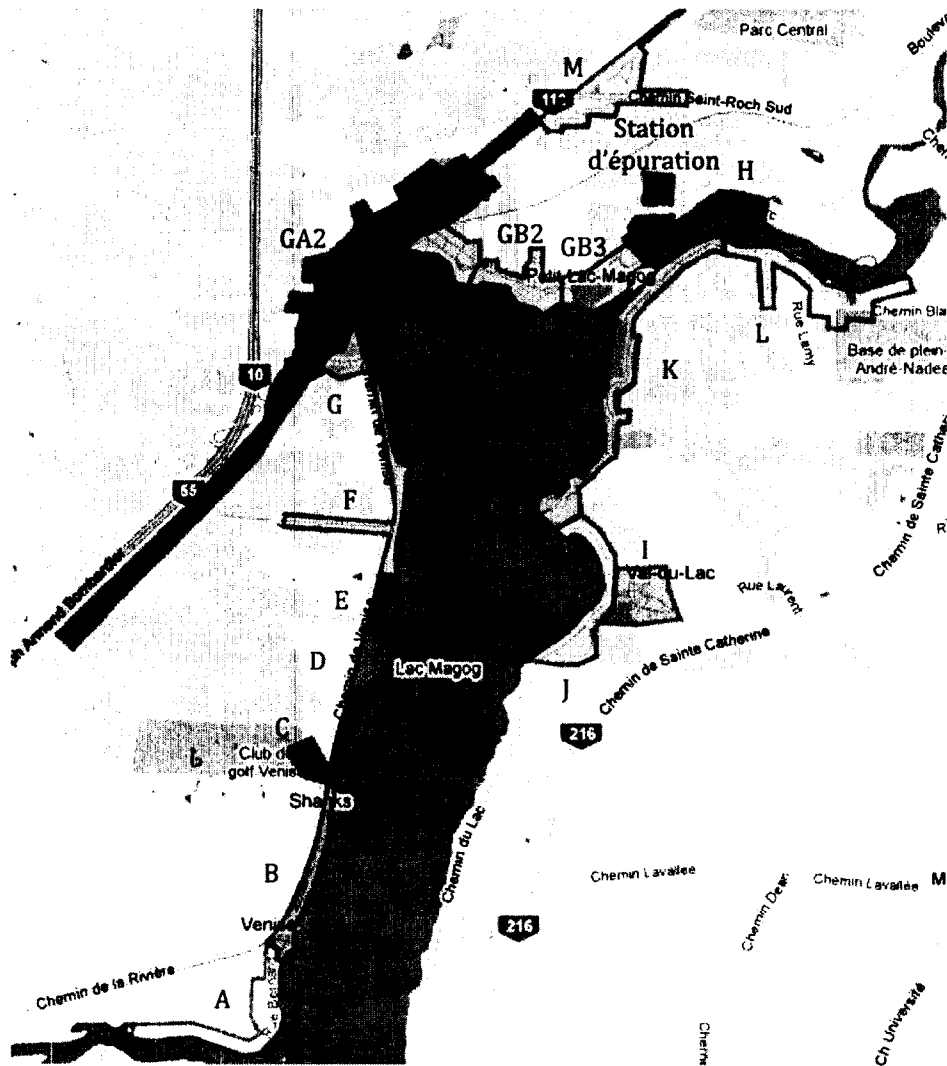


Figure 6.2 Division du territoire desservi en sous-bassins et localisation de la station

Au cours des années 1990 et durant la première moitié des années 2000, le développement résidentiel dans les secteurs couverts par le réseau de collecte fait passer le nombre de personnes équivalentes desservies à environ 4500. Au même moment, les fusions municipales conduisent à l'annexion de la municipalité de Deauville et de la ville de Rock Forest à la nouvelle ville de Sherbrooke. Le canton de Magog s'est pour sa part joint à la ville de Magog. Un dernier sous-bassin (M) situé au nord de la station d'épuration est ajouté au réseau de collecte en 2005, faisant passer la population équivalente desservie à plus de 4700. L'évolution de la population et sa répartition entre les sous-bassins sont présentées plus en détail à la section 6.3. La dernière intervention d'envergure sur le réseau de collecte remonte à 2007, avec le programme de débranchement des gouttières de la Ville de Sherbrooke. Ce programme est mis en place pour réduire le débit de captage acheminé aux réseaux de collecte et aux stations d'épuration sur le

territoire de la ville de Sherbrooke, ceux-ci étant exploités près ou même au-dessus de leur capacité de conception. L'inspection de tous les bâtiments est effectuée pour identifier les gouttières de toit qui sont branchées aux drains de fondation ou qui se déversent trop près des fondations. Selon les secteurs de la ville, les drains de fondation sont raccordés au réseau pluvial ou au réseau unitaire. Dans certains cas, ces drains semblent raccordés au réseau sanitaire, même si cette configuration est interdite par la réglementation [Ville de Sherbrooke, 2007].

6.2.1 Configuration du SMAEU

Le réseau de collecte des eaux usées du SMAEU de Deauville a été conçu pour être séparatif (figure 6.3). Le réseau d'égouts sanitaire reçoit les eaux usées d'origine domestique tandis que le réseau de drainage des eaux pluviales reçoit les eaux de ruissellement ainsi que celles des drains de fondation. Les bâtiments des sous-bassins GA2, GB1 et GB2, identifiés à la figure 6.2, sont partiellement desservis par un réseau d'égouts pluvial, alors que le drainage urbain des autres sous-bassins est assuré par des fossés pluviaux situés en bordure de rue.

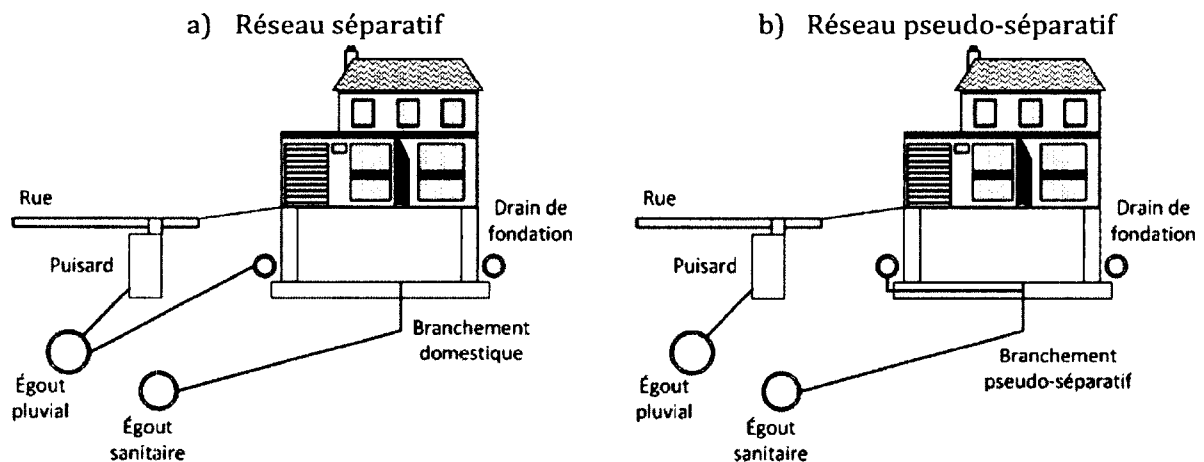


Figure 6.3 Réseaux séparatif et pseudo-séparatif [adapté de Brière, 2006]

Une campagne de mesures des débits menée entre 2005 et 2006 a illustré que le branchement illicite des drains de gouttières aux drains de fondation était une pratique répandue. Les inspections menées en 2009 suite au programme de débranchement des gouttières ont fait ressortir que moins de 1% des bâtiments étaient désormais conformes [Cyr, 2010]. Toutefois, la réduction des débits acheminés aux stations d'épuration de la Ville de Sherbrooke suite à ce programme n'est pas connue de manière précise en 2011. Dans les secteurs où le drainage est assuré par les fossés pluviaux, l'important volume d'eau claire acheminé au réseau de collecte en temps humide laisse présager que les drains de fondation de plusieurs bâtiments sont raccordés

au réseau sanitaire, s'ajoutant ainsi au débit d'infiltration. Plusieurs branchements seraient donc de type pseudo-séparatif (figure 6.3). En situation normale, les drains de fondation devraient être raccordés à une fosse de retenue pour que les eaux de drainage puissent être pompées sur le terrain, dans le fossé pluvial ou vers un plan d'eau.

Le réseau de collecte transporte les eaux usées d'origine domestique, auxquelles viennent se joindre les eaux parasites, ces dernières étant séparées en trois catégories [Brière, 2006]:

- Les eaux d'infiltration, d'origine souterraine, qui pénètrent dans le réseau d'égouts à cause de défauts au niveau des joints ou de fissures dans les conduites et regards.
- Les eaux de captage direct, observées en période de pluie, qui rejoignent le réseau sanitaire par l'intermédiaire des bouches d'égout ou des gouttières.
- Les eaux de captage indirect, qui s'insinuent dans le réseau sanitaire lors des jours suivant les précipitations lorsque les drains de fondation sont raccordés au réseau.

La technologie employée pour le transport des eaux usées diffère d'un sous-bassin à un autre. La plus grande partie du réseau est de type gravitaire et le refoulement des eaux usées vers la station d'épuration s'y fait par des postes de pompage. D'autres tronçons mobilisent des technologies alternatives, telles le réseau à basse pression ou le réseau sous vide. Dans le réseau basse pression, les eaux usées rejoignent par gravité un poste de pompage composé d'un réservoir et d'une pompe broyeuse. Habituellement, une ou deux résidences sont connectées au poste de pompage. Lorsque les eaux usées atteignent un niveau prédéfini dans le réservoir, la pompe broyeuse rejette les eaux usées dans une conduite de refoulement. À chaque cycle de pompage, les eaux usées sont progressivement acheminées vers la station d'épuration.

Pour le réseau sous vide, les eaux usées rejoignent également de façon gravitaire un puits de captage situé près des bâtiments. Le fonctionnement du réseau sous vide repose sur la vanne d'interface. Cette vanne mesure le niveau d'eau dans le puits et s'ouvre lorsque ce dernier atteint un niveau prédéfini. Comme le réseau est maintenu en état de vacuum par un poste d'aspiration central, les eaux usées sont évacuées du puits lors de l'ouverture de la vanne. Ce type de réseau a la particularité de transporter les eaux usées sous la forme d'un mélange d'air et de liquide. Une fois rendues au poste d'aspiration central, les eaux usées sont contenues dans un réservoir, puis pompées dans une conduite de refoulement vers la station d'épuration. Le type de réseau est présent dans chacun des sous-bassins est identifié au tableau 6.2.

Tableau 6.2 Types de réseau présents dans le SMAEU de Deauville

Sous-bassin	Type de réseau	Sous-bassin	Type de réseau
A	Sous vide	GB1	Gravitaire
B	Basse pression	GB2	Gravitaire
C	Basse pression	GB3	Gravitaire
D	Gravitaire	H	Gravitaire
E	Basse pression	I	Sous-vide
F	Basse pression et gravitaire	J	Gravitaire
G	Gravitaire	K	Basse pression et gravitaire
GA1	Gravitaire	L	Basse pression et gravitaire
GA2	Gravitaire	M	Gravitaire

Les eaux usées sont acheminées vers la station d'épuration à l'aide d'une série de postes de pompage, tel qu'illustré à la figure 6.4. Les postes Dion, Perras et Val-du-Lac possèdent des ouvrages de surverse permettant d'acheminer le trop-plein d'eaux usées vers le plan d'eau lorsque leur capacité est dépassée.

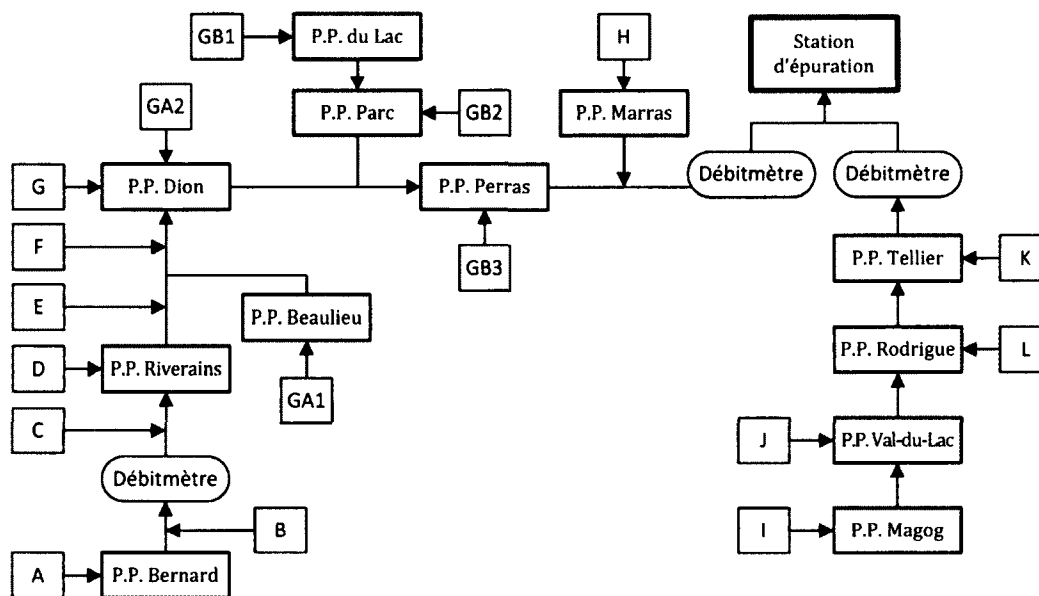


Figure 6.4 Configuration du réseau de collecte du SMAEU de Deauville

La majorité des sous-bassins sont exclusivement résidentiels (A, C, D, E, G, GA1, GB1, GB2, GB3, H, K et J). Pour les autres, quelques industries, commerces ou institutions (ICI) viennent s'ajouter aux résidences (B, GA2, J, L et M). L'évolution du nombre de personnes équivalentes desservies par le SMAEU entre 1989 et 2008 est présentée au tableau 6.3. Les données détaillées par sous-bassin sont disponibles à l'annexe H. Pour les bassins strictement résidentiels, le nombre de personnes est estimé à l'aide du nombre de résidences et du nombre de personnes moyen par

ménage [Statistique Canada, 2008]. Pour les bassins avec des ICI, les valeurs sont tirées des documents de conception de 1989 ou calculées selon la directive 004 du Gouvernement du Québec [MENV, 1989] pour les installations construites après 1989.

Tableau 6.3 Population équivalente desservie par le SMAEU en 1989 et 2008

1989			2008		
Résidentiel	ICI	Total	Résidentiel	ICI	Total
2884	570	3454	3906	820	4726

La station d'épuration est de type étangs aérés facultatifs et comporte deux bassins. Chacun d'eux est divisé en deux par un rideau séparateur, pour un total de quatre cellules. Les deux étangs ont une géométrie identique. La déphosphatation saisonnière est assurée par l'ajout d'alun entre le premier et le deuxième étang. L'aération se fait par des diffuseurs de fond reliés à trois surpresseurs pouvant fonctionner simultanément ou en alternance. L'émissaire de la station rejette l'effluent au fond de la rivière Magog, au milieu des deux rives. Le schéma d'écoulement et les dimensions des étangs sont présentés à la figure 6.5.

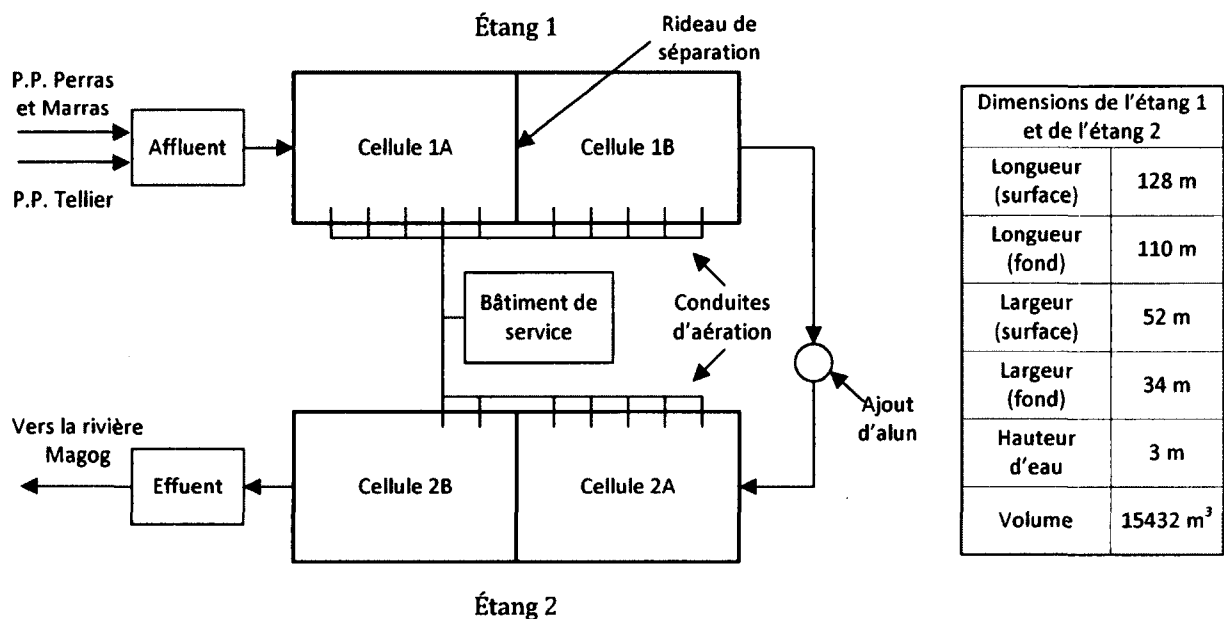


Figure 6.5 Schéma d'écoulement de la station d'épuration et dimensions des étangs

Le réseau de collecte et la station d'épuration sont assujettis aux exigences du MDDEP fixées en 1989. En ce qui concerne le réseau, il ne doit pas survenir de débordements aux ouvrages de surverse, excepté en cas d'urgence (Dion, Perras et Val-du-Lac) ou en période de fonte des neiges

(Val-du-Lac). La station doit pour sa part rencontrer des exigences de rejet sur une base saisonnière et annuelle. Le tableau 6.4 décrit l'ensemble des exigences et spécifie les périodes de l'année visées par celles-ci. L'exigence sur le rendement s'applique lorsque la concentration ou la charge à l'effluent n'est pas respectée en raison d'une concentration trop élevée à l'affluent.

Tableau 6.4 Exigences de rejet pour le SMAEU de Deauville

Paramètre	Période	Charge (kg/d)	Concentration (mg/L)	Rendement (%)
DBO ₅	01/01 - 31/03	37	20	80
	01/07 - 30/09	19	15	90
	Année	26	20	85
Phosphore total	15/05 - 14/11	1,4	1	80
Coliformes fécaux	01/06 - 30/09	n.a.	Moyenne géo. 2000 UFC/100ml	n.a

6.2.2 Gestion et financement du SMAEU

Le SMAEU de Deauville a été construit en différentes phases, selon des modalités variant d'une période à une autre. Les premiers travaux d'importance, réalisés en 1979, sont supportés à 75% par des subventions gouvernementales (provincial et fédéral). La portion non subventionnée est financée par la municipalité de Deauville par un emprunt associé à une taxe d'amélioration locale répartie sur 20 ans. La portion de cette taxe destinée à financer les travaux communs est calculée selon la superficie des terrains tandis que l'autre portion servant à financer les travaux municipaux est répartie selon la valeur des propriétés. L'opération du SMAEU est pour sa part financée par un tarif annuel.

La réalisation des travaux de 1989 est chapeauté par la SQAE et financée en partie par le PAEQ et le PAIRA (Programme d'aide à l'implantation des réseaux d'aqueduc). Dans le cadre du PAEQ, les infrastructures sont classées en trois catégories : les ouvrages d'assainissement (station d'épuration), les ouvrages d'interception (postes de pompage et conduites de refoulement) et les travaux municipaux (égout local). Les ouvrages d'assainissement admissibles sont subventionnés à 90% par le PAEQ tandis que les ouvrages d'interception le sont à un niveau de 67%. Les travaux municipaux doivent pour leur part être subventionnés par l'intermédiaire d'autres programmes, tels le PAIRA. La portion non subventionnée des travaux municipaux est financée par les municipalités par un ou plusieurs règlements d'emprunt. Les citoyens desservis ont à payer une première taxe (selon l'étendue en front) pour les infrastructures locales et les ouvrages d'interception non subventionnés, une seconde taxe pour les ouvrages communs non

subventionnés (selon l'évaluation) ainsi qu'un tarif annuel pour l'opération du SMAEU. La taxe calculée selon l'étendue en front est répartie sur 20 ans ou peut être payée en argent comptant par les citoyens, ce qu'environ le tiers des résidents choisissent de faire. Les travaux réalisés au cours des années 1990 et en 2005 pour l'extension du réseau de collecte sont aussi financés par l'intermédiaire d'une taxe d'amélioration locale.

6.2.3 Suivi technique du SMAEU

Le suivi technique du SMAEU repose sur de nombreuses données relatives au réseau de collecte (débits et utilisation des ouvrages de surverse) et à la station d'épuration (concentrations et charges à l'affluent et à l'effluent). Les méthodes utilisées pour amasser ces données sont brièvement décrites dans cette section. Les données servent à l'analyse technique du SMAEU décrite à la section 6.3 ainsi qu'à l'analyse de la durabilité présentée à la section 6.4.

Le suivi des débits dans le réseau est assuré par trois débitmètres magnétiques. Le premier est situé au point de mesure Venise (après les sous-bassins A et B), à la limite entre la ville de Sherbrooke et la ville de Magog. Les deux autres se trouvent à la station d'épuration, un sur la conduite de refoulement provenant des postes de pompage Marras et Perras et l'autre sur la conduite de refoulement provenant du poste de pompage Tellier. La somme des débits observés aux deux derniers débitmètres correspond au débit total à l'affluent de la station. Le débit à l'effluent de la station est mesuré à l'aide un déversoir muni d'une sonde à ultrasons. Les données des débitmètres sont disponibles sur une base horaire et sont compilées sur une base journalière. La campagne de suivi des débits menée par la Ville de Sherbrooke couvre les années 2005 à 2008. Pour certaines périodes, les données ne sont pas disponibles à cause d'un mauvais fonctionnement des débitmètres ou des appareils de télémétrie. Les débits d'eau potable ont également été obtenus de la Ville de Sherbrooke pour être comparés aux débits d'eaux usées domestiques calculés. Comme ces débits ne concernent que la portion du territoire correspondant aux sous-bassins C à H, la consommation d'eau potable sur l'ensemble du réseau a été extrapolée sur la base de la population équivalente. Cette estimation est valable vu la forte proportion de bâtiments résidentiels dans chacun des sous-bassins.

L'estimation des débits transitant par le réseau de collecte est interprétée en fonction des conditions météorologiques. Les données sur les précipitations liquides proviennent de deux pluviomètres opérés par la Ville de Sherbrooke (bureau d'arrondissement Rock Forest-St-Élie-Deauville et poste d'incendie de Deauville). Les données sur la température sont tirées de la

station d'Environnement Canada de Sherbrooke tandis que celles sur la neige au sol sont tirées de la station de Bromptonville. Bien que la station de Magog soit située plus près du territoire à l'étude, les données à cette station étaient incomplètes ou manquantes pour la période visée.

Les informations sur les débordements aux ouvrages de surverse du réseau de collecte sont transmises par la Ville de Sherbrooke au ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT) par l'intermédiaire du système de suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux (SOMAE). Les échantillons prélevés à l'affluent et à l'effluent de la station d'épuration sont analysés selon les exigences du MAMROT. Les paramètres obligatoires à l'affluent sont la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO₅), les matières en suspension (MES) et le phosphore total (P_T). Aux analyses obligatoires s'ajoutent aussi celles sur l'azote Kjeldahl total (NTK). Ces analyses se font trois fois par année, chacune des fois sur trois jours consécutifs, à partir d'un échantillon composite de 24 heures. À l'effluent, les paramètres obligatoires sont plus nombreux et incluent : la DCO, la DBO₅, les MES, le P_T, l'azote ammoniacal total (NH₃-NH₄⁺) et les coliformes fécaux (C.F.). Des analyses additionnelles visant l'azote Kjeldahl total (NTK) et la somme des nitrites-nitrates (NO₂-NO₃) sont aussi réalisées. Le calendrier d'échantillonnage pour l'effluent est décrit au tableau 6.5. Les années 2003 à 2008 sont couvertes par le suivi de la station d'épuration.

Tableau 6.5 Calendrier annuel d'échantillonnage à l'effluent de la station d'épuration

Paramètres	Nombre	Fréquence
DCO	18	1 par mois (printemps et automne) et 2 par mois (hiver et été)
DBO ₅	18	
MES	18	
NH ₃ -NH ₄ ⁺	18	
P _T	12	2 par mois (15 mai au 14 novembre)
NO ₂ -NO ₃	8	1 par mois (été) et tous les 2 mois (reste de l'année)
C.F.	8	2 par mois (juin à septembre)

6.2.4 Suivi budgétaire du SMAEU

Les données portant sur les coûts de construction et d'opération du système servent à l'analyse des coûts sur le cycle de vie présentée à la section 6.4.2. Les coûts des travaux réalisés en 1989 ont été récupérés des archives de la Municipalité de Deauville, de la Ville de Rock Forest et du Canton de Magog. Les coûts des travaux sont décrits de manière détaillée dans les documents colligés par la SQAÉ. En ce qui concerne les travaux de 1979, seuls les montants globaux pour les travaux communs et les travaux locaux ont pu être retracés. La répartition des coûts entre les

composantes (postes de pompage, conduites, etc.) pour les travaux réalisés en 1979 s'est faite selon les détails obtenus sur les travaux de 1989. Les activités réalisées lors de la mise en place des infrastructures sont données au tableau 6.6.

Tableau 6.6 Activités associées à la construction du SMAEU

Assainissement	Interception	Travaux municipaux
<ul style="list-style-type: none"> • Préparation du site • Aménagement des étangs • Construction des postes de pompage à l'affluent • Construction du bâtiment de service • Pose de la tuyauterie et de mécanique de procédé 	<ul style="list-style-type: none"> • Pose des collecteurs (gravitaire et refoulement) • Pose des regards • Construction des postes de pompage • Construction des postes d'aspiration 	<ul style="list-style-type: none"> • Pose des égouts gravitaires, à basse pression et sous vide • Installation des postes à basse pression et des puits de captage sous vide • Branchement des résidences au réseau

Tel que décrit précédemment, des travaux locaux additionnels de faible envergure ont été réalisés entre 1979 et 1989, puis après 1989. Pour ces travaux, seuls les montants globaux ont pu être retracés grâce aux règlements d'emprunt correspondants. Les coûts ont encore une fois été répartis entre les diverses composantes selon les détails disponibles pour les travaux de 1989. Les coûts d'opération et d'entretien du SMAEU ont été obtenus de la Ville de Sherbrooke. Les principales activités d'opération et d'entretien sont énumérées au tableau 6.7.

Tableau 6.7 Activités associées à l'opération du SMAEU

Station d'épuration	Postes de pompage	Réseau de collecte
<ul style="list-style-type: none"> • Entretien des surpresseurs et des autres équipements • Entretien du terrain et du bâtiment • Analyses en laboratoire • Consommation de produits chimiques et d'électricité 	<ul style="list-style-type: none"> • Entretien des pompes, génératrices et branchements électriques • Télémétrie • Remplacement des pompes • Nettoyage des postes à basse pression • Consommation d'électricité 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspection des regards et des conduites • Réparations aux regards et aux conduites • Réparation aux branchements • Curage

6.3 Analyse technique du SMAEU dans sa configuration actuelle

L'évaluation technique du SMAEU dans sa configuration actuelle a porté sur le réseau de collecte des eaux usées, la station d'épuration ainsi que la gestion des boues d'épuration. Les objectifs de cette évaluation sont de vérifier la capacité du système à respecter les exigences actuelles et futures ainsi que d'identifier ses points faibles, ceci en vue de sa modernisation.

6.3.1 Analyse du réseau de collecte des eaux usées

Trois postes de pompage disposent d'ouvrage de surverse et ceux-ci servent à acheminer les eaux usées vers les plans d'eau lorsque la capacité des postes est excédée. Les débordements observés depuis 2004 à ces postes de pompage sont détaillés au tableau 6.8.

Tableau 6.8 Débordements aux ouvrages de surverse du réseau de collecte

Année	Nombre de débordements			
	Pluie	Fonte	Urgence	Totaux
2004	9	4	1	14
2005	2	3	0	5
2006	6	0	0	6
2007	1	1	2	4
2008	0	0	3	3

Note : la durée totale des débordements n'est pas donnée, car la durée de certains débordements est inconnue.

Les exigences pour les ouvrages de surverse (aucun débordement sauf en situation d'urgence) n'ont pas été respectées de 2004 à 2007, surtout en raison de débordements au poste de pompage Dion. Il est à noter que ce poste ne dispose pas d'un ouvrage de surverse conventionnel. Lors des débordements, les eaux usées sont pompées vers un fossé pour éviter que le poste Perras, en aval, ne déborde à son tour. Le non-respect des exigences sur une base récurrente est à l'origine du moratoire imposé par le MDDEP sur l'extension du réseau. Les débordements surviennent habituellement lors de la fonte des neiges ou lors de fortes précipitations, ce qui laisse entrevoir l'importante présence d'eaux parasites. La mise en place du programme de débranchement des gouttières en 2007 ainsi que le remplacement des pompes au poste Perras en 2009 sont susceptibles d'avoir amélioré la performance du réseau de collecte.

L'analyse des débits d'eaux usées acheminés à la station d'épuration par le réseau de collecte a permis d'évaluer le débit associé aux eaux parasites et celui associé aux eaux usées domestiques. Ces débits varient en fonction des conditions météorologiques (température et précipitations) ou du niveau de la nappe phréatique. Les débits observés à l'intérieur d'une même journée varient également en fonction de la consommation d'eau potable. La variabilité quotidienne des débits est montrée à la figure 6.6 pour quelques situations typiques (les valeurs pour les précipitations se rapportent uniquement aux conditions en temps humide):

- temps sec et nappe phréatique basse (12 au 14 septembre 2005);
- temps sec et nappe phréatique haute (2 au 4 novembre 2006);
- temps humide (27 au 29 août 2006).

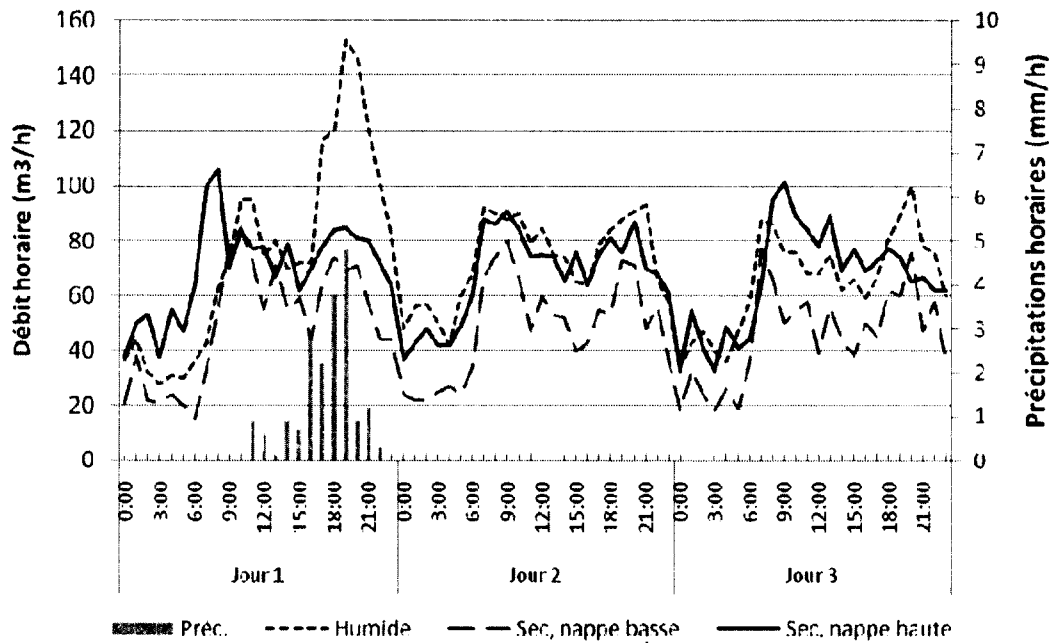


Figure 6.6 Débit horaire à l'affluent pour différentes conditions climatiques

En temps sec, la fluctuation horaire du débit est uniquement due aux variations de la consommation d'eau potable. Les pointes observées en avant-midi et en soirée découlent de la consommation plus importante le matin et sur l'heure du souper. Ces fluctuations sont les mêmes, que la nappe soit basse ou haute. La différence entre les deux conditions par temps sec est due à l'importance du débit d'infiltration, qu'il est possible d'estimer la nuit lorsque la consommation d'eau est minimale. Contrairement au temps sec, où les eaux parasites sont dues à l'infiltration et au captage indirect, le captage direct joue un rôle important par temps humide. La hausse du débit due au captage direct dans les heures suivant les précipitations est bien illustrée à la figure 6.6. Lors des périodes où le temps est sec, le débit de captage indirect est peu prononcé et le débit d'infiltration augmente peu suite aux précipitations. Un sol sec peut en effet absorber une forte quantité d'eau dans cette situation. Par contre, lorsque les précipitations sont observées pendant plusieurs jours à un moment où le sol est déjà saturé en eau, le captage direct se combine habituellement à une hausse du débit de captage indirect (drains de fondation sont sollicités) et d'infiltration (intrusion d'eau par les défauts accentués).

Lors des épisodes de fonte, les phénomènes d'infiltration, de captage direct et de captage indirect sont amplifiés. Le débit de pointe en temps de fonte est semblable à celui observé lors de fortes précipitations, mais perdure pour de nombreuses journées. Dépendamment des années, la période de fonte peut comporter quelques épisodes de redoux entrecoupés de semaines plus

froides ou bien avoir lieu lorsque le temps froid fait définitivement place au temps plus doux. La durée des périodes de fonte est affectée par la quantité de précipitations solides reçues au cours de l'hiver ainsi que de l'écart entre les températures observées et le point de congélation. Les débits journaliers d'eaux usées domestiques et parasites ont été calculés à l'aide des équations 6.1 à 6.5, conformément aux définitions fournies à la section 6.2.1. Tous les débits sont exprimés en m³/d. Les équations 6.1 et 6.2 sont proposées pour le temps sec, lorsque le débit à l'affluent est constitué d'eaux usées domestiques et d'eaux d'infiltration.

$$Q_{inf} = Q_{min,s} \quad (6.1)$$

Où :

Q_{inf} : Débit d'infiltration

$Q_{min,s}$: Débit nocturne horaire minimal (survenant entre 0h et 6h) en temps sec

$$Q_{dom} = Q_{moy,s} - Q_{inf} \quad (6.2)$$

Où :

Q_{dom} : Débit d'eaux usées domestiques (incluant les ICI)

$Q_{moy,s}$: Débit moyen journalier en temps sec

Les équations 6.3 et 6.4 sont utilisées pour le temps humide, lorsque les eaux de captage direct et indirect viennent s'ajouter aux eaux usées domestiques et aux eaux d'infiltration.

$$Q_{cap,d} = Q_{per,h} - Q_{per,s} \quad (6.3)$$

Où :

$Q_{cap,d}$: Débit de captage direct

$Q_{per,h}$: Débit moyen du début des précipitations jusqu'à six heures après la fin des précipitations

$Q_{per,s}$: Débit moyen observé sur la période couvrant les mêmes heures que celles retenues pour calculer $Q_{per,h}$ en temps sec lors des journées précédant les précipitations

Une durée de six heures suivant la fin de précipitations est retenue pour l'équation 6.3 car ceci correspond approximativement au temps de séjour pour les eaux usées provenant des extrémités du réseau de collecte.

$$Q_{cap,i} = Q_{moy} - Q_{dom} - Q_{inf,s} - Q_{cap,d} \quad (6.4)$$

Où :

$Q_{cap,i}$: Débit de captage indirect, calculé pour les deux jours suivant la fin des précipitations

Q_{moy} : Débit moyen journalier

$Q_{inf,s}$: Débit d'infiltration moyen observé lors du temps sec précédant et suivant les précipitations

Tel que défini à l'équation 6.5, le débit parasite constitue la somme des débits de captage et du débit d'infiltration.

$$Q_{par} = Q_{inf} + Q_{cap,d} + Q_{cap,i} \quad (6.5)$$

Pour confirmer le débit d'eaux usées domestiques estimé, celui-ci est comparé avec le débit d'eau potable consommé. Ce dernier est ajusté à l'aide de l'équation 6.6, proposées pour prendre en compte les fuites dans le réseau de distribution ainsi que le taux de retour à l'égout.

$$Q_{dom,ep} = Q_{ep}(1 - T_p)(T_r) \quad (6.6)$$

Où :

$Q_{dom,ep}$: Débit d'eaux usées domestiques estimée à partir de la consommation d'eau potable

Q_{ep} : Débit d'eau potable estimé pour le territoire desservi

T_p : Taux de perte dans le réseau de distribution d'eau potable (%)

T_r : Taux de retour de l'eau potable aux égouts domestiques (%)

Le taux de perte dans le réseau est fixé à 12%, ce qui correspond à la moyenne sur le territoire de la ville de Sherbrooke. Un taux de retour aux égouts domestiques de 90% est suggéré pour les communautés nordiques en période froide [Metcalf & Eddy, 2003]. Le débit d'eaux usées domestique ne peut être estimé à partir de l'eau potable consommée de mi-mai à mi-octobre. Durant ces mois, une portion non négligeable de l'eau potable consommée n'est pas retournée aux égouts (remplissage des piscines, arrosage des pelouses, nettoyage extérieur, etc.) ce qui a pour conséquence de faire varier le taux de retour à l'égout (T_r) sur une base hebdomadaire.

Les valeurs calculées pour les débits entre 2005 à 2008 sont présentées au tableau 6.9. Les données sur les précipitations liquides et sur le niveau du lac Memphrémagog sont aussi présentées, car les débits de captage et d'infiltration devraient être corrélés à ces variables. Comme l'embouchure du lac Memphrémagog est située à environ 10 km du lac Magog, le niveau de ce plan d'eau est jugé représentatif du niveau de la nappe phréatique. De plus, la station hydrométrique du lac Memphrémagog est celle se trouvant le plus près du territoire du SMAEU. Les données mensuelles de débits (eaux usées et eau potable) sont disponibles à l'annexe G. Les valeurs présentées au tableau 6.9 illustrent bien la variabilité des débits calculés d'une année à l'autre. Le débit d'eaux usées domestique est stable ($\pm 10 \text{ m}^3/\text{d}$), mais les conditions climatologiques induisent une plus forte variabilité en ce qui concerne la présence d'eaux

parasites ($\pm 50 \text{ m}^3/\text{d}$). Un peu plus de la moitié du débit total (51%) est attribuable aux eaux usées domestiques tandis que l'autre portion est constituée d'eaux parasites (49%). Le captage direct (4%) et indirect (5%) sont environ du même ordre de grandeur, mais sont d'importance moindre que le débit d'infiltration (40%).

Tableau 6.9 Synthèse des débits pour les années 2005 à 2008

	Q_{moy} (m^3/d)	Q_{dom} (m^3/d)	$Q_{\text{dom,ep}}$ (m^3/d)	Q_{inf} (m^3/d)	$Q_{\text{cap,d}}$ (m^3/d)	$Q_{\text{cap,i}}$ (m^3/d)	Q_{par} (m^3/d)	Pr (mm)	Pr_{moy} (mm)	$N - N_{\text{moy}}$ (m)
2005	1615	820	832	602	75	101	782	1091	907	0,00
2006	1681	823	833	667	69	83	856	1163	907	+0,02
2007	1606	839	827	617	43	59	723	801	907	-0,07
2008	1648	810	826	696	64	64	838	925	907	+0,10
Moy.	1618	824	829	654	63	77	794	995	907	+0,01

Notes : les données pour octobre à décembre 2007, janvier à juin 2008 et octobre à décembre 2008 sont manquantes.

Pr (précipitations annuelles) et Pr_{moy} (précipitations moyennes).

N (niveau du lac Memphrémagog) et N_{moy} (niveau moyen du lac Memphrémagog).

Les valeurs propres au SMAEU de Deauville sont comparées au tableau 6.10 aux valeurs typiquement observées sur les réseaux de collecte, exprimées en litres par personne par jour.

Tableau 6.10 Débits pour le SMEAU de Deauville et débits typiques

Débit	Domestique (L/p.d)	Infiltration (L/p.d)	Captage direct (L/p.d)	Captage indirect (L/p.d)
Deauville	174	138	13	16
Brière [2006]	225	60	50	

Pour les eaux usées domestiques, la valeur calculée est en dessous de la valeur typique pour les quartiers résidentiels, mais est presque égale à celle estimée pour la distribution d'eau potable. La présence de résidences secondaires ainsi que la popularité croissante des appareils ménagers à faible consommation d'eau expliquent probablement cette différence. Le débit d'infiltration dans le réseau correspond à plus du double de celui rencontré habituellement. Le phénomène d'infiltration est favorisé par la proximité de plans d'eau. De plus, une portion plus âgée du réseau de collecte (sous-bassins GA1 et GA2) affichait déjà un niveau d'infiltration plus élevé que la normale lors des travaux de 1989. Pour la plupart des autres sous-bassins, cette situation est toutefois anormale, car le réseau y est récent (20 ans ou moins) et mobilise des technologies réduisant les risques d'infiltration (réseau à basse pression ou sous vide). Dans ces circonstances, une partie du débit d'infiltration correspond probablement au captage indirect lié

au branchement des drains de fondation. Ce phénomène est toutefois impossible à distinguer de celui de l'infiltration à partir des débits horaires mesurés, car les drains de fondation apportent des eaux parasites dans le réseau de collecte sur une base continue.

Le débit de captage total est pour sa part plus faible que la valeur typique, mais son ampleur correspond à la valeur prévue lors de la conception en 1989, soit 26 m³/d. Toutefois, le captage direct est surestimé, car le captage indirect vient s'y superposer durant une partie des précipitations. Il existe en effet une différence de quelques heures entre le temps de parcours des eaux usées provenant des bâtiments situés près de la station et ceux situés aux extrémités du réseau. Ainsi, le captage indirect provenant des bâtiments à proximité de la station est mesuré simultanément avec le captage direct des bâtiments situés plus loin à la fin d'un épisode de pluie.

Pour les mois précédant la mise en place du programme de débranchement des gouttières, le débit de captage direct calculé par l'équation 6.3 a été comparé au débit acheminé à la station par l'intermédiaire des gouttières raccordées aux drains de fondation. L'équation 6.7 est proposée pour estimer cette dernière valeur.

$$Q_{cap,g} = A(Pr)(Nr)(R)(T_g)(T_d) \quad (6.7)$$

Où :

$Q_{cap,g}$: Débit de captage transmis par les gouttières (m³/d)

A : Surface moyenne de toiture pour les résidences desservies (m²)

Nr : Nombre de résidences n'ayant pas accès au réseau d'égout pluvial

Pr : Précipitations liquides sur la période visée (m/d)

R : Coefficient de ruissellement

T_g : Proportion de maisons ayant leurs gouttières reliées aux drains de fondation (%)

T_d : Proportion de maisons ayant leurs drains de fondation relié à l'égout sanitaire (%)

La surface moyenne des toitures est estimée à 80 m² et le nombre de résidences n'ayant pas accès à l'égout pluvial est d'environ 1300. Le facteur de ruissellement retenu est de 0,85, une valeur typique pour les toitures [Brière, 2006]. Lors de l'inspection des bâtiments réalisée avant le programme de débranchement de gouttières, la proportion des maisons ayant des gouttières non conformes était d'environ 50%. La proportion de maisons ayant leurs drains de fondation reliés à l'égout sanitaire est aussi estimée à 50% comme aucune donnée n'est disponible. Les valeurs calculées pour le captage direct selon les précipitations liquides par l'équation 6.7 sont comparées au tableau 6.11 avec les valeurs moyennes calculées pour les années 2005 à 2007.

Comme les gouttières ne sont pas la seule source de captage direct, l'estimation effectuée à de l'équation 6.7 devrait normalement être inférieure au captage direct observé. Toutefois, la valeur estimée à partir des précipitations est aussi susceptible d'être surestimée, car tous les drains de gouttière d'une maison jugée non conforme lors des visites effectués par la Ville de Sherbrooke n'étaient pas nécessairement branchés aux drains de fondation. Le calcul du débit de captage direct rapporté au tableau 6.9 est jugé acceptable, car ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celle estimées au tableau 6.11 ($\pm 10 \text{ m}^3/\text{d}$).

Tableau 6.11 Débit de captage calculé et estimé selon les précipitations

Année	Pr (mm/d)	$Q_{\text{cap,d}}$ (m^3/d)	$Q_{\text{cap,g}}$ (m^3/d)	$Q_{\text{cap,d}} - Q_{\text{cap,g}}$ (m^3/d)
2005	2,99	75	66,1	-8,9
2006	3,18	69	70,3	+1,3
2007	1,28	23	28,3	+5,3

Note : les mois de 2007 avant le programme de débranchement des gouttières sont inclus (janvier à mai)

Il est difficile de juger de l'efficacité du programme de débranchements des gouttières en comparant les débits observés avant et après l'été 2007, car le débit de captage observé varie selon les précipitations. De plus, comme les lectures de débits sont inexistantes ou faussées pour la période d'octobre 2007 à juin 2008, les moyennes annuelles pour 2007 et 2008 (tableau 6.10) ne reposent que sur des données partielles. Faute d'observations à long terme, la réduction de débit obtenue par le programme de débranchement des gouttières a été estimée en comparant les débits observés lors d'événements semblables en 2006 et 2008. Les événements retenus pour 2006 (avant le programme) et 2008 (après le programme) sont présentés au tableau 6.12.

Tableau 6.12 Événements retenus pour estimer la réduction du débit de captage

	Date	Pr (mm)	Durée (h)	T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$)
A-2006	26/06/06	28,7	12	23,0
B-2006	20/08/06	33,1	12	17,6
C-2006	27/08/06	22,2	11	13,1
D-2006	29/09/06	25,6	10	10,1
E-2006	04/10/06	13,2	7	12,9
F-2006	12/10/06	10,0	6	11,6

	Date	Pr (mm)	Durée (h)	T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$)
A-2008	22/07/08	18,9	8	20,5
B-2008	31/07/08	25,6	12	17,9
C-2008	18/08/08	9,0	5	18,0
D-2008	09/09/08	29,6	13	13,3
E-2008	01/10/08	14,0	11	13,7

Les événements sont comparés au tableau 6.13 pour estimer la réduction du débit de captage obtenue grâce au débranchement des gouttières. La comparaison se limite à un faible nombre

d'événements, car il s'est avéré difficile d'identifier plusieurs situations suffisamment semblables sur la courte période pour laquelle les données sont disponibles.

Tableau 6.13 Événements retenus pour estimer la réduction du débit de captage

Événements	Pr moy	Durée moy	T moy	Qcap,d	Réduction
E et F-2006	11,6	6,5	12,3	217	50%
C et E-2008	11,5	7,5	15,9	108	
C et D-2006	23,9	10,5	11,6	479	30%
A et B-2008	24,3	10,0	19,2	337	
A et B-2006	30,9	12	20,3	593	32%
F-2008	29,6	13	13,3	402	

Selon le tableau 6.13, la réduction du débit de captage direct obtenue par le programme de débranchement des gouttières est de 50%. Ceci correspond au niveau lors de courts événements où l'influence du captage indirect est minimisée. Pour les épisodes de pluie durant plus de huit heures, la réduction estimée est plus faible, car le captage indirect se superpose au débit de captage direct. Or, rien ne porte à croire que le captage ait diminué entre 2006 et 2008. Ainsi, la part du débit de captage direct calculé au tableau 6.9 correspondant à du captage indirect est estimée à 30%, cette fraction n'ayant pas été affectée par le débranchement des gouttières.

6.3.2 Analyse de la station d'épuration

La caractérisation de la station d'épuration porte sur les propriétés des eaux usées à l'affluent, la dynamique épuratoire ainsi que le respect des exigences actuelles et projetées. Les caractéristiques moyennes de l'affluent entre 2003 et 2008 sont présentées au tableau 6.14.

Tableau 6.14 Caractéristiques moyennes de l'affluent pour la période 2003-2008

	DCO		DBO5		MES		NTK		Ptot	
	kg/d	g/p.d	kg/d	g/p.d	kg/d	g/p.d	kg/d	g/p.d	kg/d	g/p.d
2003-2008	538	116	196	42	298	63	42	8,9	6,7	1,4
MDDEP [2011a]		125		50		60		10		2

Les valeurs moyennes à l'affluent masquent la grande variabilité observée d'une année à l'autre, cette variabilité étant probablement associée au programme d'échantillonnage. En effet, seules trois campagnes d'échantillonnage, durant chacune trois jours, sont menées par année, ce qui limite leur représentativité. Ainsi, les valeurs moyennes sur l'ensemble de la période couverte et non les valeurs annuelles sont retenues pour les calculs subséquents liés à la modélisation du processus épuratoire. Les charges, exprimées en grammes par personne par jour au tableau 6.14,

sont semblables à celles recommandées pour la conception dans la littérature [MDDEP, 2011a]. Seule la valeur pour le phosphore est significativement plus faible que celle attendue.

Respect des exigences actuelles

La performance de la station d'épuration pour l'enlèvement de la DBO₅ de 2003 à 2008 est décrite au tableau 6.15. De faibles dépassements ont été observés en 2003 et 2005, mais aucun entre 2006 et 2008 inclusivement. Les exigences sont facilement respectées en été et sur une base annuelle. Toutefois, la station d'épuration est plus près de sa capacité maximale de traitement en hiver, soit 67% pour la charge et 87% pour la concentration en moyenne.

Tableau 6.15 DBO₅ à l'effluent de la station entre 2003 et 2008

Période	Hiver		Été		Année	
	(kg/d)	(mg/L)	(kg/d)	(mg/L)	(kg/d)	(mg/L)
Exigence	37	20	19	15	26	20
2003	33,1	26,2	13,6	10,8	18,4	13,7
2004	20,5	15	13,2	8,3	14,4	9,9
2005	27,6	20,7	19,4	14,8	19,1	13,0
2006	17,8	11	4,9	3,2	10,8	6,5
2007	28,5	18,2	4,8	3,5	13,2	8,3
2008	20,3	12,8	11,0	6,6	14,6	8,9

L'enlèvement de la DBO₅ observé est comparé à celui calculé par le modèle de premier ordre proposé par le MDDEP [2010a] (équation 6.8).

$$S_e = S_o \left(\frac{1}{1 + K_e t} \right) FC \quad (6.8)$$

Où :

S_e : DBO₅ à l'effluent de l'étang (mg/L)

S_o : DBO₅ à l'affluent de l'étang (mg/L)

K_e : Taux d'enlèvement de la DBO₅ ou constante cinétique (d⁻¹)

t : temps de rétention (d)

FC : facteur de correction saisonnier (apport de DBO₅ dû à la décomposition des boues)

La même équation s'applique à toutes les cellules de l'étang, l'effluent de la cellule 1 devenant l'affluent de la cellule 2 et ainsi de suite. Les détails de ce modèle ainsi que les données de base pour les trois variantes comparées sont exposés à l'annexe H. La première variante se base sur le volume des étangs à la conception et les températures proposées par le MDDEP [2010a], la seconde variante se base sur le volume effectif et les températures mesurés en 2006, alors que la troisième variante intègre en plus les constantes de cinétique proposées par Teknika [1997]. Les concentrations et les charges à l'effluent selon les trois variantes du modèle sont comparées aux

performances observées et aux exigences de rejet dans le tableau 6.16. À la dernière ligne est donnée la différence relative entre la performance annuelle observée et celle modélisée.

Tableau 6.16 Performance calculée et observée pour l'enlèvement de la DBO5 en 2006

	Observé		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Exigences	
	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)
Hiver	11,0	17,8	34,6	55,5	26,1	41,8	16,4	26,4	20	37
Print.	7,0	12,0	28,3	49,8	6,5	11,5	7,9	13,9	20	26
Été	3,2	4,9	7,0	11,1	2,2	3,4	4,6	7,2	15	19
Aut.	5,0	8,4	27,8	46,9	14,2	4,9	11,8	19,8	20	26
Diff.	n.a.	n.a.	+273%	+279%	+87%	+43%	+55%	+56%		

La performance observée lors de l'année 2006 est meilleure que la performance prédite par le modèle dans ses trois variantes. Il est normal de constater que les variantes ajustées sont plus précises comme la température mesurée aux étangs est plus élevée que celle proposée par le MDDEP [2010a] et que le volume utile augmente avec le débit. La troisième variante donne les résultats se rapprochant le plus du rendement réel et est la seule anticipant le respect des exigences de rejet à l'effluent. Ceci semble confirmer que les coefficients de cinétique du MDDEP [2010a] sont sous-estimés pour les températures froides. De manière à valider sa robustesse, la variante 3 a été utilisée pour estimer la performance en 2007 et 2008. Les valeurs obtenues, similaires à la performance réelle, sont données à l'annexe H.

Ainsi, cette variante est retenue pour le dimensionnement des options envisagées au chapitre 7. Tel que mentionné précédemment, l'exigence annuelle sur la DBO₅ s'accompagne d'exigences saisonnières sur le phosphore et les coliformes fécaux. L'enlèvement du phosphore total et des coliformes fécaux à la station d'épuration entre 2003 et 2008 sont présentés au tableau 6.17.

Tableau 6.17 P_T et C.F. à l'effluent de la station entre 2003 et 2008

P _T	Charge (kg/d)	Conc. (mg/L)	Rend. (%)
Exigence	1,4	1,0	80
2003	1,22	0,87	82
2004	1,36	0,95	80
2005	1,10	0,72	84
2006	1,18	0,69	82
2007	1,38	0,92	79
2008	1,19	0,71	82

Note : du 15 mai au 14 novembre

C.F.	Moyenne géométrique (UFC/100ml)
Exigence	2000
2003	117
2004	266
2005	788
2006	228
2007	220
2008	927

Note : du 1^{er} juin au 30 septembre

Entre 2003 et 2008, les exigences sont respectées autant pour le phosphore que pour les coliformes fécaux. Les étangs aérés atteignent un niveau de performance supérieur à celui requis pour les coliformes fécaux, tandis que la marge de manœuvre est plus faible pour le phosphore. L'enlèvement de phosphore observé est comparé avec celui anticipé selon le rapport Al:P [MDDEP, 2010b]. Le rapport Al:P varie entre 1,4 et 1,8 avec un taux d'enlèvement du phosphore se situant entre 78% et 84%, ce qui est semblable à ce qui est mentionné dans la littérature.

Exigences future anticipées

Les nouvelles normes de performance pancanadienne sur la DBO₅, les MES et l'azote ammoniacal non ionisé entreront en vigueur au Québec au cours des prochaines années. Ces normes s'appliqueront immédiatement pour tout système faisant l'objet d'une augmentation de capacité, pour ensuite viser progressivement les stations existantes. Il est ainsi pertinent de vérifier si la station d'épuration rencontre actuellement ces exigences. Vu la taille et le type de la station de Deauville, les exigences devront être respectées sur une base trimestrielle. Les normes pancanadiennes pour la DBO₅ et les MES sont toutes de deux 25 mg/L. Les caractéristiques de l'effluent pour ces deux paramètres sur la période 2003-2008 sont présentées au tableau 6.18.

Sauf pour l'hiver 2003, où un léger dépassement est observé, la norme de 25mg/L pour la DBO₅ est respectée pour la période étudiée. Cette norme est moins stricte que l'exigence déjà imposée par le MDDEP (15 mg/L ou 20 mg/L selon la saison). Les mois d'hiver sont ceux où la concentration à l'effluent se rapproche le plus de la norme pancanadienne sur la DBO₅.

Tableau 6.18 DBO₅ et MES à l'effluent sur une base trimestrielle de 2003 à 2008

	DBO ₅ (mg/L)						MES (mg/L)					
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Hiver	26,2	15,0	20,7	11,0	18,2	12,8	27,0	18,5	18,9	10,8	17,0	22,2
Print.	11,0	8,5	11,5	7,0	6,0	6,7	10,3	9,0	8,4	5,3	11,0	12,0
Été	10,8	8,3	14,8	3,2	3,5	6,6	16,6	12,2	15,8	6,8	12,3	13,0
Aut.	6,7	7,7	5,0	5,0	5,3	9,4	7,0	12,7	8,6	24,7	16,3	21,0

Les MES à l'effluent de la station de Deauville ne font pas actuellement l'objet d'une exigence de rejet. Néanmoins, la future norme pancanadienne de 25 mg/L est respectée, si l'on exclut un léger dépassement à l'hiver 2003. Ainsi, la zone de sédimentation d'environ 2 jours dans la dernière cellule du deuxième étang permet de réduire suffisamment les MES. Comme pour la DBO₅, les MES à l'effluent sont plus près de l'exigence en hiver que lors des autres saisons.

Suite à la mise en œuvre du plan d'intervention du MDDEP [2011b] sur les algues bleu-vert, la concentration et la charge admissibles à l'effluent pour le phosphore ont été abaissées, respectivement à 0,8 mg/L et 0,9 kg/d, ce qui correspond à un enlèvement minimal de 87%. De plus, cette exigence s'applique désormais à l'année. Il est possible d'atteindre ce niveau d'enlèvement à l'aide du dispositif existant de déphosphatation, mais le rapport massique Al:P devra être augmenté pour accroître le rendement.

Bien que l'azote ammoniacal ne fasse pas l'objet d'exigence de rejet, sa contribution potentielle à la toxicité de l'effluent est reconnue par les gouvernements provincial et fédéral. La toxicité pour les organismes aquatiques est associée à la portion non ionisée (NH_3) de l'azote ammoniacal total ($NH_4^+ + NH_3$) [Environnement Canada, 2003]. Le projet de réglementation canadienne prévoit une exigence de 1,25 mgN- NH_3 /L pour la fraction non ionisée de l'azote ammoniacal à une température de 15°C, calculée à l'aide de l'équation 6.9 à partir de l'azote ammoniacal total.

$$[NH_3] = [NH_3 + NH_4^+] \left(\frac{1}{1 + 10^{9,56 - pH}} \right) \quad (6.9)$$

Le gouvernement québécois réalise pour sa part le suivi de l'azote ammoniacal total à la station d'épuration depuis 2006 et calcule la fréquence de dépassement de la valeur aigüe finale (VAF) à l'effluent. La VAF correspond à la concentration pouvant tuer 50 % des organismes sensibles qui y sont exposés. Les valeurs admissibles à l'effluent selon les approches fédérale et provinciale [MDDEP, 2011c] sont données au tableau 6.19 pour quelques valeurs de pH.

Tableau 6.19 Limites pour l'azote ammoniacal total à l'effluent (Canada et Québec)

pH	Canada	Québec	
	$[NH_3 + NH_4^+]_{max}$ (mgN/L)	VAF (hiver) (mgN/L)	VAF (été) (mgN/L)
6,5	1436	52	48
7,0	455	42	38
7,5	145	26	24
8,0	46,6	12	11
8,5	15,6	3,9	3,8

Comme les valeurs proposées par le MDDEP sont plus strictes que celles retenues par le gouvernement fédéral, le respect de la VAF assure le respect de l'exigence fédérale. L'azote ammoniacal total ainsi que la VAF à l'effluent sont présentés à la figure 6.7 pour les années 2006

à 2008. Les fluctuations du pH à l'effluent (entre 6,6 et 7,9) expliquent la variation de la VAF. Pour les trois années couvertes, la période de nitrification s'étend approximativement de la mi-juillet à la mi-octobre. Même en absence de nitrification, la concentration en azote ammoniacal total se situe habituellement en-deçà de la VAF. Le MAMR [2007] définit quatre classes pour lier le potentiel toxique dû à l'azote ammoniacal à la fréquence de dépassement de la VAF. Avec quatre dépassements en 36 mois, la fréquence de dépassement égale 11%, ce qui situe la station sur la limite entre un potentiel faible (moins de 10%) et un potentiel moyen (entre 10% et 50%).

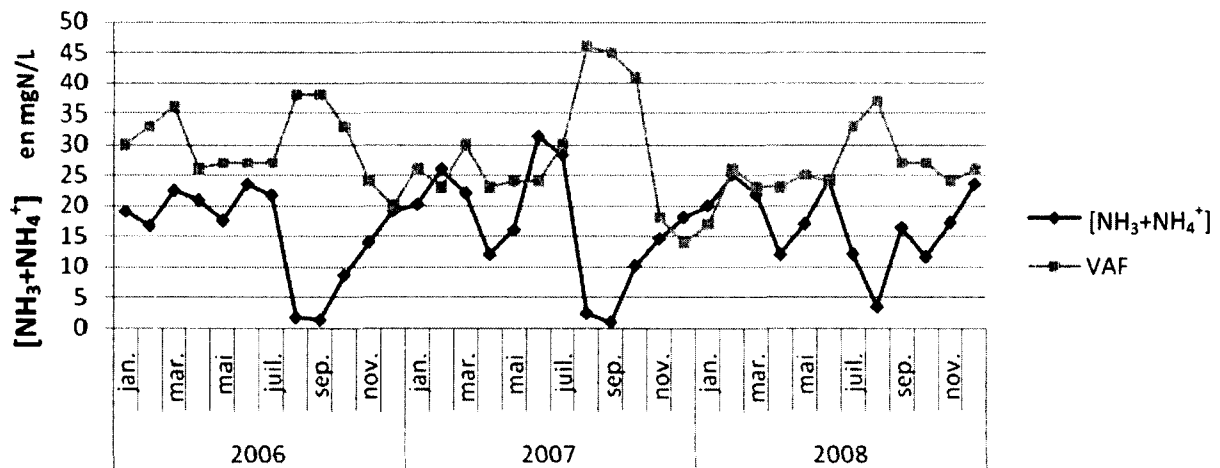


Figure 6.7 Azote ammoniacal total et valeur aigüe finale à l'effluent entre 2006 et 2008

Des exigences québécoises sur l'azote ammoniacal total plus strictes que celles imposées par la réglementation canadienne ne sont pas envisagées à court ou moyen terme pour les stations d'épuration recevant des eaux usées domestiques résidentielles. Actuellement, seuls les projets comportant l'apport d'une forte charge d'azote ammoniacal additionnelle sont soumis au respect de la VAF [MDDEP, 2011c]. Les eaux usées fortement chargées en azote ammoniacal peuvent par exemple provenir de sites d'enfouissement ou de l'industrie agroalimentaire.

6.3.3 Analyse des boues d'épuration

Au Québec, la valorisation des matières résiduelles fertilisantes (MRF), dont font partie les boues d'épuration, est assujettie à l'obtention d'un certificat d'autorisation (C.A.) du MDDEP ou à l'obtention d'une certification du Bureau de normalisation du Québec (BNQ). Ces boues (aussi appelées biosolides municipaux) peuvent être directement valorisées par épandage ou être utilisées comme intrant pour la production de compost. La valorisation énergétique par biométhanisation est également envisageable. Trois catégories de critères sont définies par le

MDDEP [2008] pour classer les MRF : les critères relatifs aux contaminants chimiques (catégorie C), les critères portant sur la présence d'agents pathogènes (catégorie P) et les critères relatifs aux odeurs (catégorie O). Le respect des critères selon les différents paramètres de chacune des catégories rend possible la valorisation des MRF selon les usages permis par le MDDEP [2008].

La concentration des contaminants chimiques dans les boues de l'étang 1 de la station de Deauville ainsi que les teneurs maximales selon les critères C1 et C2 sont données à l'annexe H. Les analyses ne portent que sur les boues de l'étang 1 et datent de 2004. Aucune analyse sur les boues de l'étang 1 ou 2 n'a été effectuée depuis. Bien que le critère C1 ne soit pas respecté pour quelques contaminants (arsenic, cobalt, cuivre, cadmium et mercure), le critère C2 n'est pas dépassé pour aucun contaminant. En ce qui concerne les agents pathogènes (catégorie P), les boues d'étangs non vidangées depuis 4 ans rencontrent habituellement le critère pour la catégorie P2 (concentration en bactéries *E. coli* inférieur à 2 000 000 NPP/g) sans aucun traitement additionnel. Le respect du critère pour la catégorie P1 requiert pour sa part un séchage thermique ou tout autre traitement permettant de réduire significativement la teneur des pathogènes (*E. coli* et salmonelles). L'échelle retenue pour les odeurs précise quatre niveaux (O1, O2, O3 et hors catégorie) caractérisant un potentiel malodorant croissant. Les boues d'étangs sont classées dans la catégorie O2 (malodorant) selon le MDDEP [2008].

Les boues des étangs de Deauville se classent ainsi dans le groupe C2-P2-O2. Leur épandage sur une culture fourragère pour alimentation animale ou en sylviculture est donc envisageable. Leur utilisation comme intrant dans un procédé de compostage rendrait aussi possible la rencontre de critères plus stricts. Toutefois, comme la station de Deauville ne dispose pas d'un dégrilleur, le tamisage des boues est nécessaire pour respecter l'exigence sur les corps étrangers. Les boues doivent en effet être exemptes de pièces de métal, de verre ou de plastique mesurant plus de 2mm. Les boues de l'étang 1, vidangées en 2005 alors que le volume occupé était de 12%, ont été enfouies. Aucune fréquence de vidange n'est imposée, mais la mesure annuelle du niveau des boues doit être faite lorsque le volume occupé dépasse 10%. De plus, le SMAEU est dimensionné pour un volume occupé par les boues maximal de 15%. L'accumulation des boues dans les étangs a aussi été étudiée, car la digestion des boues d'épuration au fond des étangs aérés facultatifs est un phénomène mal caractérisé dans la littérature. Il est toutefois important de connaître le taux d'accumulation effectif pour prévoir la fréquence de vidange des boues. À cette fin, un bilan de masse à l'état stationnaire sur la biomasse produite (matières volatiles et matières non volatiles)

a été complété (figure 6.8). Les MES à l'affluent sont composées des matières volatiles en suspension biodégradables (MVSb) ou non-biodégradable (MVSnb), ainsi que des matières non volatiles en suspension (MNVS). Les MVSb correspondent à la DBO₅ particulaire et celle-ci est assimilée par la biomasse, comme la DBO₅ soluble. Les MVSnb et les MNVS se retrouvent pour leur part en grande partie dans les boues, piégées par les floccs de biomasse. La fraction volatile des boues est en partie digérée, selon des processus aérobie et anaérobie. En dernier lieu, les MES à l'effluent sont principalement composées de biomasse.

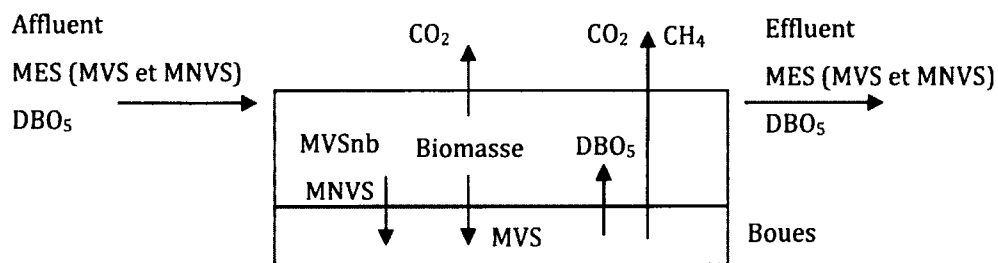


Figure 6.8 Bilan de masse sur les matières volatiles et fixes à la station d'épuration

Les charges à l'affluent (DBO₅ et MES) sur la période 1990-2004 sont estimées à partir de la population moyenne et des charges typiques par personne. Le débit moyen est pour sa part estimé à partir des données partielles obtenues pour les périodes 1995-1997 et 1999-2002. Les données sur les boues de l'étang 1 ont été acquises lors de campagnes de mesure en 2003 et 2004. Quelques données sur les caractéristiques de l'effluent (DBO₅ et MES) sont également disponibles pour la période 1999-2002. Les équations 6.10 et 6.11 sont utilisées pour calculer le bilan de masse.

$$MVS_{bp} = MVS_{ba} + MVS_{bd} + MVS_e \quad (6.10)$$

Où :

MVS_{bp} : MVS dans les boues produites (kg/d)

MVS_{ba} : MVS dans les boues restantes en fond d'étang (kg/d)

MVS_{bd} : MVS dans les boues digérées (kg/d)

MVS_e : MVS à l'effluent (kg/d)

$$MNVS_{bp} = MNVS_{ba} + MNVS_e \quad (6.11)$$

Où :

$MNVS_{bp}$: MVS dans les boues produites (kg/d)

$MNVS_{ba}$: MVS dans les boues restantes en fond d'étang (kg/d)

$MNVS_e$: MVS à l'effluent (kg/d)

Les équations et les coefficients utilisés pour la modélisation des processus de production et de digestion des boues sont donnés à l'annexe H. Les résultats sont présentés au tableau 6.20.

Tableau 6.20 Résultats pour le bilan de masse sur les MVS et MNVS à la station d'épuration

	Production	Accumulation	Digestion	Effluent
MVS (kg/d)	118,2	13,0	87,9	18,0
MNVS (kg/d)	53,9	20,0	n.a.	2,0

Les taux de digestion utilisés ont été ajustés de manière à boucler le bilan de masse pour les MVS. Toutefois, l'accumulation des MNVS observée en fond d'étang est beaucoup moins importante (39% de la quantité anticipée) que ne le laisse présager la production de boues. Cet écart s'explique probablement par la lente compaction des MNVS en fond d'étang, celles-ci se fixant progressivement à la couche d'argile permettant l'imperméabilisation des bassins.

6.3.4 Consultation des experts

La performance technique des SMAEU dépasse le seul respect des exigences, comme en font foi la gamme de critères recensés à la section 2.6.3. La nature de ces critères complémentaires les rend difficiles, voire impossibles, à modéliser. Leur évaluation repose plutôt sur le jugement expert. Un groupe de quatre experts a été consulté pour évaluer le système selon cinq critères (tableau 6.23) de manière à raffiner l'analyse technique. Tel que mentionné à la section 5.2.2, l'importance des critères et le respect des critères ont été évalués selon une échelle de type Likert à sept niveaux. Les experts ont évalué le critère T1 (conditions de travail) pour le SMAEU tandis que les critères T2 à T5 ont été évalués séparément pour le réseau et la station. L'importance moyenne de chaque critère et l'évaluation de la performance du SMAEU sont présentées au tableau 6.21.

Tableau 6.21 Résultats de la consultation des experts sur les critères techniques

	Critère	Importance moy. (0-6)	Évaluation (0-6)		
			moy.	min.	max.
	T1-Conditions de travail	6,0	3,5	2	4
Réseau	T2r- Fiabilité et robustesse	5,3	2,5	2	3
	T3r - Facilité de construction	4,5	2,3	1	3
	T4r- Facilité d'opération et d'entretien	4,3	2,5	1	3
	T5r - Flexibilité et adaptabilité	3,5	1,8	1	2
Station	T2s- Fiabilité et robustesse	4,5	3,8	3	4
	T3s - Facilité de construction	3,8	5,5	5	6
	T4s- Facilité d'opération et d'entretien	5,0	5,0	4	6
	T5s - Flexibilité et adaptabilité	3,8	2,5	2	3

Selon les experts interrogés, la plupart des critères se classent entre les niveaux important (4) et très important (6). Les trois critères apparaissant comme étant les plus importants sont : les conditions de travail, la fiabilité et la robustesse du réseau ainsi que la facilité d'opération et d'entretien de la station. La performance du réseau est systématiquement plus faible que celle de la station. Le réseau satisfait peu l'ensemble des critères proposés, avec des évaluations se situant entre 1,8 et 2,5. La flexibilité et l'adaptabilité du réseau est le critère dont l'évaluation est la plus faible avec 1,8. La station satisfait beaucoup la plupart des critères, sauf en ce qui concerne le critère de flexibilité et d'adaptabilité. L'évaluation diverge peu d'un répondant à l'autre, l'écart entre les valeurs maximale et minimale étant de 1 ou 2 selon l'échelle à sept niveaux. Ainsi, un consensus est observé parmi le petit nombre d'experts consultés. Les critères ayant reçu une évaluation moyenne inférieure à 3 sont énumérés au tableau 6.22, accompagnés des commentaires donnés par les répondants.

Tableau 6.22 Commentaires sur l'évaluation technique par les experts

Critère	Éval.	Commentaires
T5r – Flexibilité et adaptabilité	1,8	La taille des conduites existantes et la capacité des postes de pompage rendent difficiles l'extension du réseau. Les interventions sont également compliquées par le manque d'espace.
T3r – Facilité de construction	2,3	La construction du réseau à proximité de plans d'eau a été difficile à certains égards. L'utilisation de technologies peu connues en 1989 (basse pression et sous vide) a requis des activités supplémentaires (essais, négociations pour servitudes, partage des équipements, etc.)
T2r- Fiabilité et robustesse	2,5	Les branchements illicites (gouttières et drains de fondation) mettent beaucoup de pression sur le réseau et réduisent sa capacité à faire face à des événements extrêmes.
T4r- Facilité d'opération et d'entretien	2,5	L'utilisation de multiples postes de pompage à basse pression et puits de captage sous vide complique l'opération et l'entretien. La présence d'odeurs à certains points dans le réseau occasionne parfois des plaintes.
T5s – Flexibilité et adaptabilité	2,5	Le réseau a été conçu selon la population projetée tandis que la station a été conçue pour la population en 1988. Celle-ci reçoit ainsi un débit dépassant le débit de conception. L'augmentation de la capacité des étangs aérés par l'optimisation de l'exploitation est difficile.

6.3.5 Conclusions

Les résultats présentés aux sections 6.3.1 à 6.3.4 permettent de tirer plusieurs conclusions sur la performance technique du SMAEU. En ce qui concerne le réseau, les débordements aux ouvrages de surverse indiquent l'importante présence d'eaux parasites, tout particulièrement lors des épisodes de pluie et lors de la période de fonte. L'estimation des débits parasites soutient cette observation et démontre que près de la moitié des eaux usées transitant par le réseau de collecte

sont dues à l'infiltration et au captage indirect. Les données compilées ne permettent toutefois pas de déterminer la contribution exacte de l'infiltration et du captage indirect, car ces deux phénomènes sont observés simultanément. Les analyses menées à la station d'épuration indiquent que les exigences de rejet sont actuellement respectées, mais que la capacité supplémentaire de traitement est faible. De plus, le respect de futures exigences associées au projet de réglementation canadienne n'apparaît pas problématique, en autant que la population desservie n'augmente pas de manière significative. En ce qui concerne les boues d'épuration, diverses avenues de valorisation demandant une qualité moyenne sont envisageables dans la mesure où les corps étrangers sont retirés. En dernier lieu, la consultation des experts a donné des résultats cohérents avec ceux obtenus par l'analyse du réseau et de la station. Ainsi, les problèmes touchant le réseau de collecte sont plus critiques que ceux affectant la station d'épuration. Néanmoins, la flexibilité et l'adaptabilité sont des points faibles selon les experts consultés autant pour le réseau que pour la station.

6.4 Analyse de la durabilité du SMAEU dans sa configuration actuelle

Tout comme pour le volet technique, l'évaluation de la durabilité du SMAEU existant est réalisée dans le but d'identifier ses faiblesses et ses points forts ainsi que d'orienter la recherche de solutions en vue de sa modernisation. De nombreux enjeux environnementaux, économiques et sociaux sont explorés à l'aide des critères et outils présentés à la section 5.2.1.

6.4.1 Analyse environnementale du cycle de vie

La performance environnementale du système a été évaluée à l'aide de l'analyse environnementale du cycle de vie (AECV). L'AECV sur le SMAEU de Deauville a été réalisée en suivant les quatre phases suivantes [ISO 2006a] : définition de l'objectif et du champ d'étude, analyse de l'inventaire, évaluation de l'impact et interprétation.

Objectifs et champ d'étude

L'AECV sert à identifier les étapes du cycle de vie du SMAEU ayant le plus d'impact sur l'environnement. Elle est employée avec d'autres outils dans un cadre d'évaluation de la durabilité. La fonction du SMAEU est d'empêcher l'exposition des citoyens aux eaux usées (protection de la santé humaine) et de préserver les usages qui sont fait des plans d'eau (préservation des écosystèmes locaux) par le respect des exigences. L'unité fonctionnelle est de protéger la santé humaine et de préserver les écosystèmes locaux par la collecte et le traitement

des eaux usées de 4726 personnes équivalentes, dans le respect des exigences et sur un période de 75 ans. Les frontières du champ d'étude sont présentées à la figure 6.9.

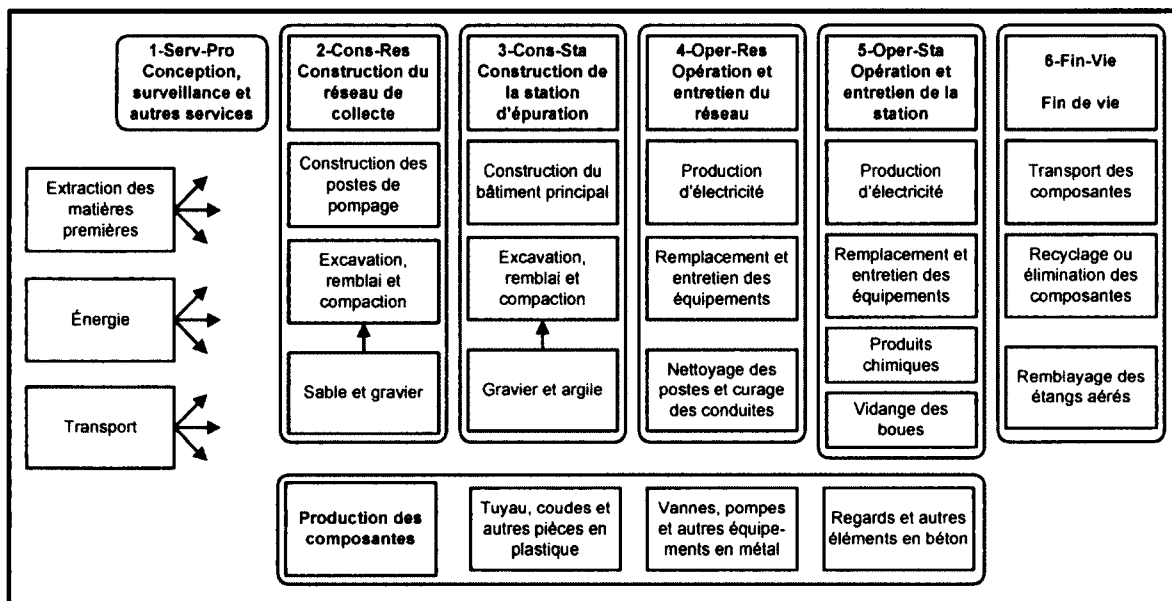


Figure 6.9 Frontières du champ d'étude

Bien qu'inclue dans le champ d'étude, l'étape de fin de vie est traitée de manière moins détaillée que les autres étapes. Tel que soulevé à la section 2.6.5, les activités associées à la fin de vie des infrastructures urbaines ont habituellement une importance marginale et sont exclues dans la majorité des AECV recensées. L'inclusion de la phase de fin de vie permet néanmoins de confirmer sa faible contribution dans le cas du SMAEU de Deauville. En dernier lieu, les émissions à l'effluent sont aussi exclues, car le respect des exigences implique que le SMAEU rempli sa fonction. Il apparaît donc incohérent d'inclure les émissions à l'effluent dans l'inventaire alors que leur concentration se situe en deçà des exigences, d'autant plus que les exigences sont fixées par le MDDEP suite à une évaluation des écosystèmes locaux bien plus précise que celle permise par les méthodes d'évaluation des impacts sur le cycle de vie disponibles actuellement.

Comme l'unité fonctionnelle ne peut varier sur la durée du cycle de vie, il est posé que l'ensemble des infrastructures ont été mises en place en 1989 et que la population est constante. L'inventaire est ainsi calculé comme si le système était exploité dans sa configuration actuelle sur une durée de 75 ans, soit de 1990 à 2064. Ceci est conforme aux recommandations de Lundin et Morrison [2002], qui proposent d'évaluer la durabilité des infrastructures urbaines selon une perspective temporelle variant entre 50 et 100 ans.

Analyse de l'inventaire

Les principales composantes incluses dans le champ d'étude sont énumérées au tableau 6.23 avec les sources de données correspondantes pour la compilation de l'inventaire. L'analyse de l'inventaire requiert de dresser l'inventaire de production, soit la quantité d'intrants (pièces, matériaux, énergie, services, etc.) requise pour chacun des éléments du champ d'étude. L'inventaire des émissions et extractions est ensuite réalisée pour quantifier les ressources extraites et les substances émises dans l'environnement lors de la production des intrants. L'inventaire détaillé du SMAEU, qui a été compilé dans le logiciel SimaPro (version 7.3), est disponible à l'annexe I et contient les données pour les éléments énumérés au tableau 6.23.

Tableau 6.23 Sources de données pour l'analyse de l'inventaire

Sous-système	Éléments inclus	Inventaire de production	Émissions et extractions
Services préalables	Conception, surveillance du chantier et services de financement	Frais incidents	MIET 3.0
Fabrication des pièces et équipements	Réseau (conduites, regards, postes de pompage, purgeurs d'air, etc.) Station (conduites d'aération, aérateurs, surpresseurs, moteurs, etc.)	Ecoinvent 2.2 Plans et devis Soumissions et spécifications	Ecoinvent 2.2
	Réseau (génératrices) Station (mécanique de procédé et débitmètres)	Soumissions	MIET 3.0
Construction du réseau de collecte	Excavation, remblai et compactage Sable et gravier Postes de pompage	Ecoinvent 2.2 Plans, devis et soumissions	Ecoinvent 2.2
	Postes d'aspiration	Soumissions	MIET 3.0
Construction de la station d'épuration	Bâtiment principal Excavation, remblai et compactage Gravier et argile	Ecoinvent 2.2 Plans, devis et soumissions	Ecoinvent 2.2
	Déboisement, voies de circulation et autres travaux d'aménagement	Soumissions	MIET 3.0
Opération et entretien	Réseau (électricité, diesel pour génératrices, nettoyage des postes basse pression, remplacement des équipements, etc.) Station (électricité, alun, remplacement des équipements, vidange des boues, etc.)	Ecoinvent 2.2 Rapports annuels d'opération	Ecoinvent 2.2
	Réseau et station (services et réparations)	Rapports annuels d'opération	MIET 3.0
Transport	Matériaux de base, produits semi-finis, équipements et matières résiduelles	Distances typiques selon Ecoinvent 2.2	Ecoinvent 2.2
Fin de vie	Activités au dépôt de matériaux secs et aux lieux d'enfouissement	Construction, opération et entretien	Ecoinvent 2.2

La principale banque de données utilisée est Ecoinvent 2.2 [Ecoinvent Centre, 2010]. Cette banque de données contient principalement des données européennes. Selon la matrice d'évaluation de la qualité des données proposées par le Ecoinvent Centre [2007], l'incertitude induite par l'utilisation de données européennes dans un contexte nord-américain est faible. De plus, il n'existe aucune banque de données nord-américaine comparable à Ecoinvent en ce qui a trait à la gamme des processus couverts ou la qualité des données. Cette banque est complétée par la banque de données MIET 3.0 [Suh, 2004] lorsque nécessaire. La banque de données MIET 3.0 repose sur le tableau d'entrées-sorties économiques des États-Unis et l'impact environnemental moyen pour les secteurs de l'économie est déduit à partir des émissions et extractions globales pour chaque secteur. Pour les composantes dont les données sont tirées de la banque MIET 3.0, le prix du producteur a été obtenu à partir du coût exigé par les entrepreneurs ou les fournisseurs, en y retranchant les profits ainsi que les coûts de main d'œuvre selon les taux disponibles dans RS Means [2008].

En ce qui concerne le SMAEU de Deauville, le réseau de collecte des eaux usées a été mis en place en même temps que le réseau de distribution d'eau potable et les routes. Ainsi, une partie de l'excavation des tranchées, du remblayage, du compactage et des matériaux granulaires a dû être allouée à chacune de ces infrastructures. Pour les tranchées hors route, la moitié des intrants ont été alloués au réseau de collecte et l'autre moitié au réseau de distribution d'eau potable. Pour les tranchées en route, le remblayage, le compactage et les matériaux granulaires pour les 800mm sous le niveau du sol ont été alloués à la route tandis que le reste des intrants ont été alloués à part égale entre le réseau de collecte et le réseau de distribution d'eau potable. Les distances de transport (tableau 6.24) sont basées sur les valeurs suggérées dans la banque de données Ecoinvent 2.2 [Ecoinvent Centre, 2010] et sont ajustées selon les particularités régionales.

Tableau 6.24 Distances et modes de transport considérées pour l'inventaire

	Mode de transport	Distance (km)
Transport au dépôt de matériaux secs	Camion 32 tonnes	20
Matériaux de base (gravier, béton, etc.)	Camion 32 tonnes	30
Transport au site d'enfouissement	Camion 32 tonnes	50
Produits semi-finis (métaux, plastique, etc.)	Camion 32 tonnes	300
Produits finis (pompes, vannes, etc.)	Camion 32 tonnes	800

Le calcul de l'inventaire lié à la production de l'électricité est une tâche délicate, car celle-ci varie grandement d'une province ou d'un État à l'autre en Amérique du Nord. De plus, les réseaux

régionaux de distribution sont interconnectés et ne peuvent être considérés comme indépendants du contexte nord-américain. Le choix du mélange québécois est préférable si l'on considère que l'électricité est achetée à Hydro-Québec et que les installations lui appartenant sont situées sur le territoire du Québec. Toutefois, comme les réseaux des membres du NPCC sont interconnectés, il est physiquement impossible de savoir où l'énergie consommée est produite. De plus, la stabilité du réseau repose sur la contribution de chacun des producteurs. Ainsi, les mélanges énergétiques du Québec et du nord-est de l'Amérique du Nord (*Northeast Power Coordinating Council* ou NPCC) ont tous deux été retenus sans que l'un ne soient préféré à l'autre pour l'évaluation du SMAEU existant. La comparaison avec les autres études européennes et nord-américaines est facilitée par l'utilisation du mélange du NPCC.

Le mélange énergétique pour chacune des régions est donné au tableau 6.25. Le profil calculé pour le Québec inclut les importations et les exportations et le profil du nord-est de l'Amérique du Nord correspond au réseau du NPCC. Ces données sont basées sur les statistiques gouvernementales disponibles pour les années 2006 à 2007 sur la production d'électricité [Environnement Canada, 2010b; Hydro-Québec, 2009a; IEA, 2010a; IEA, 2010b; MRNF, 2009; USDOE, 2007; USDOE, 2008] ainsi que sur les échanges commerciaux [Office national de l'énergie, 2007; Office national de l'énergie, 2008].

Tableau 6.25 Mélanges énergétiques considérés pour l'inventaire

	Hydro	Nucléaire	Mazout	Gaz	Charbon	Autres
Québec	92,1%	3,5%	0,5%	2,1%	0,6%	1,2%
NPCC	42,1%	24,6%	2,7%	16,4%	11,5%	2,7%

La fréquence de remplacement des équipements est basée sur les informations fournies par la Ville de Sherbrooke. Ainsi, les équipements mécaniques (pompes, surpresseurs, etc.) ont une durée de vie de 20 ans tandis que les infrastructures (conduites, bassins des postes de pompage, étangs, etc.) ont une durée de vie équivalente à celle du système dans son ensemble, soit 75 ans.

Tel que justifié dans la section sur les objectifs et le champ d'étude, les émissions à l'effluent sont exclues de l'inventaire. De plus, les émissions atmosphériques dans le réseau de collecte sont jugées négligeables par rapport à celles survenant à la station, ce qui est cohérent avec les autres études recensées [Lundin *et al.*, 2000, Lassaux *et al.*, 2006, Lundie *et al.*, 2004]. L'inventaire des émissions atmosphériques (carbonées et azotées) associées à la station d'épuration a pour sa

part été estimé par la modélisation du processus épuratoire et de la décomposition des boues en fond d'étang. La figure 6.10 illustre les éléments inclus dans le calcul du bilan sur le carbone effectué pour les étangs aérés facultatifs.

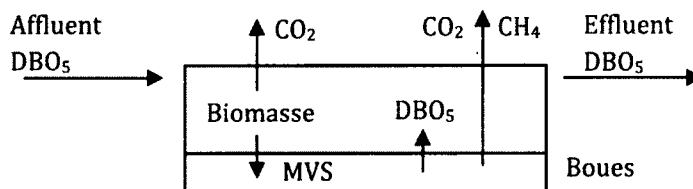


Figure 6.10 Bilan sur le carbone pour les étangs aérés facultatifs

Le carbone entrant à l'affluent et sortant à l'effluent a été estimé à partir des mesures de la DBO₅. Les émissions associées à la dégradation de la matière organique et à la décomposition des boues ont pour leur part été déduites en modélisant la dynamique épuratoire. Les équations, les coefficients et les références utilisées à cet effet sont données à l'annexe I. Les émissions, calculées sur une base massique, sont réparties selon les pourcentages donnés au tableau 6.26.

Tableau 6.26 Répartition des émissions carbonées

Formes de carbone	Carbone entrant		Carbone sortant	
	Affluent	Boues	Atmosphère	Effluent
COT	100%	17,7%	0%	12,5%
CO ₂	0%	0%	63,7%	0%
CH ₄	0%	0%	6,1%	0%

Les étangs aérés facultatifs sont aussi la source d'émissions atmosphériques azotées, soit le NH₃, le N₂O et le N₂. La fraction non ionisée de l'azote ammoniacal (NH₃), sous l'action du brassage dans les étangs, est émise par volatilisation. Ce phénomène est accentué par un pH et une température élevés [Craggs, 2005]. Le protoxyde d'azote (N₂O) est aussi généré lors de la nitrification et la dénitrification [Ahn et al., 2010] tandis que l'azote gazeux (N₂) est émis lors de la dénitrification. La figure 6.11 illustre le cheminement des composés azotés.

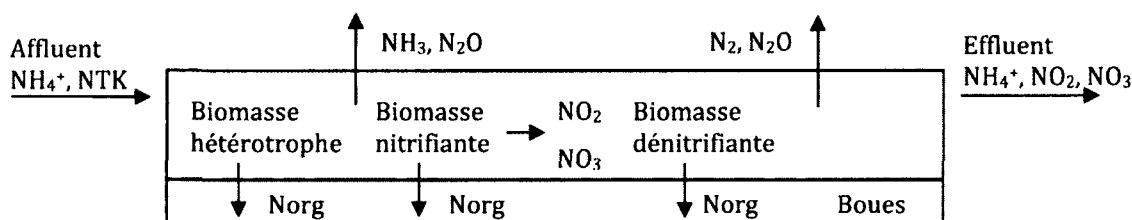


Figure 6.11 Bilan sur l'azote pour les étangs aérés facultatifs

L'azote entrant à l'affluent et sortant à l'effluent a été estimé à partir des analyses réalisées pour le suivi de la station. Les émissions à l'atmosphère sont pour leur part basées sur le bilan de masse, à l'exception des émissions en N₂O basées sur les valeurs proposées dans la littérature. Les facteurs d'émissions sont présentés à l'annexe I et les résultats sont donnés au tableau 6.27. En absence de nitrification, une grande proportion de l'azote présent à l'affluent se retrouve à l'effluent. Une petite fraction de l'azote est néanmoins transférée dans les boues (azote particulaire et biomasse). Même si le processus de volatilisation de l'azote ammoniacal survenant dans les étangs aérés n'est pas bien caractérisé dans la littérature, il est raisonnable de croire que ce processus contribue à l'enlèvement de l'azote [Craggs, 2005; Surampalli *et al.*, 1999]. En effet, la quantité d'azote se retrouvant dans les boues et à l'effluent est inférieure à celle à l'affluent. Il est posé que cette différence découle des émissions d'azote ammoniacal à l'atmosphère.

Tableau 6.27 Répartition des émissions azotées sans nitrification

Formes d'azote	Azote entrant		Azote sortant	
	Affluent	Boues	Atmosphère	Effluent
NH ₄ ⁺ - NH ₃	60%	0%	<i>17,6%</i>	78,2%
N _{org}	40%	1,2%	0%	3,0%

Note : la valeur en italique est estimée à partir des autres valeurs

Le profil des émissions est différent en période de nitrification (tableau 6.28). Celle-ci s'étend habituellement de juillet à septembre à la station de Deauville, période durant laquelle les conditions climatiques pour la croissance et le maintien de la biomasse nitrifiante sont favorables. L'écart entre les valeurs mesurées à l'affluent et celles à l'effluent s'explique par la volatilisation du NH₃ et la dénitrification. Tout comme la volatilisation du NH₃, la dénitrification survenant dans les zones anoxiques des étangs aérés est un phénomène mal caractérisé. Vu l'absence de données propres au SMAEU ou tirées de la littérature, il est posé que ces deux processus contribuent dans la même proportion à l'enlèvement de l'azote. Les émissions de N₂O sont pour leur part basées sur les valeurs données dans Anh *et al.* [2010].

Tableau 6.28 Répartition des émissions azotées avec nitrification

Formes d'azote	Azote entrant		Azote sortant	
	Affluent	Boues	Atmosphère	Effluent
NH ₄ ⁺ - NH ₃	60%	0%	<i>20,1%</i>	19,2%
N _{org}	40%	1,2%	0%	3,0%
NO ₂ - NO ₃	0%	0%	0%	36,5%
N ₂ O	0%	0%	0,06%	0%
N ₂	0%	0%	<i>20,1%</i>	0%

Note : les valeurs en italique sont estimées à partir des autres valeurs

La compilation de l'inventaire pour l'étape de fin de vie a été réalisée de manière cohérente avec l'approche retenue pour la banque de données Ecoinvent 2.2, soit celle du contenu recyclé définie au tableau 5.3. Les impacts associés au recyclage ainsi que les gains associés à une utilisation réduite de matière première sont ainsi alloués à la phase de production des matériaux. Le recyclage de ces matériaux lors de la fin de vie du système de produit à l'étude ne résulte donc pas en un crédit environnemental pour ce système [Frischknecht, 2010]. Ainsi, aucun impact ou gain environnemental n'est associé au recyclage en fin de vie pour le système à l'étude. Seuls le transport et le tri des matériaux valorisés ainsi que le transport, le tri et l'élimination des matériaux sont inclus dans l'inventaire. Le taux de récupération utilisé pour la grande majorité des composantes est posé égal à 74%, ce qui correspond au taux observé au Québec en 2008 dans le secteur de la construction, la rénovation et la démolition [Vachon *et al.*, 2009]. Seules quelques composantes dont la valorisation est problématique (joints de caoutchouc, huile à moteur, etc.) sont entièrement acheminées à l'élimination. En dernier lieu, l'excavation lors du démantèlement est allouée aux infrastructures futures plutôt qu'au SMAEU existant. Ce choix est tout d'abord justifié par le fait que l'excavation nécessaire à la mise en place des infrastructures existantes avait entièrement été allouée à la phase de construction du SMAEU existant. De plus, les conduites qui ne sont pas remplacées en fin de vie sont fréquemment remplies de sable et laissées en place, ce qui n'implique aucune excavation.

Évaluation des impacts

La méthode d'évaluation des impacts ReCiPe 1.05 [Goedkoop *et al.*, 2009] est utilisée pour quantifier les impacts environnementaux associés aux extractions et émissions compilées lors de l'inventaire. Cette méthode est la plus récente permettant à la fois la caractérisation intermédiaire et la caractérisation des dommages, en plus de la normalisation et de la pondération. La perspective hiérarchiste, dont l'utilisation est suggérée [Goedkoop *et al.*, 2009] est retenue parmi trois perspectives disponibles pour le calcul des impacts. La caractérisation des impacts a été réalisée au niveau des dommages pour limiter le nombre de catégories d'impact à prendre en compte lors de l'interprétation. Les impacts ont de plus été normalisés, c'est-à-dire exprimés de manière relative aux impacts totaux générés annuellement en Europe. La normalisation par rapport aux impacts européens est préférée à la normalisation par rapport aux impacts mondiaux totaux, car plus représentative des pays industrialisés comme le Canada. Il est important de noter que la catégorie d'impact intermédiaire des changements climatiques contribue à deux catégories de dommages, soit ceux sur la santé humaine et ceux sur les

écosystèmes. Des détails supplémentaires sur les catégories d'impact intermédiaires et de dommages incluses dans ReCiPe sont données à l'annexe I. Bien que ReCiPe soit l'une des méthodes d'impact les plus récentes disponible, elle a été développée pour le contexte européen. Le seul modèle nord-américain disponible, soit TRACI 2, a été utilisé lors de l'interprétation pour confirmer les résultats obtenus avec ReCiPe. La méthode TRACI 2 [Bare, 2011] inclut la plupart des catégories d'impact intermédiaires présentes dans ReCiPe, celles-ci étant décrites à l'annexe I. Elle ne permet toutefois pas la caractérisation au niveau des dommages ni la normalisation des impacts, ce qui limite son utilité lors de l'interprétation des résultats.

Les impacts potentiels normalisés au niveau des dommages selon ReCiPe pour le SMAEU de Deauville sont présentés à la figure 6.12. Ces impacts sont exprimés en termes de points, un point correspondant à l'impact annuel moyen d'un européen. Les résultats sont basés sur l'utilisation du mélange québécois et celui du NPCC. Avec le mélange NPCC, la phase d'opération ressort clairement comme celle ayant le plus d'impact sur le cycle de vie du SMAEU selon les trois catégories d'impact. Les impacts potentiels associés à l'opération du réseau sont du même ordre que ceux liés à l'opération de la station, sauf en ce qui concerne la consommation des ressources. Les phases de conception et de fin de vie sont négligeables. De manière relative, les impacts potentiels sur la consommation des ressources et sur la santé humaine sont plus importants que ceux sur les écosystèmes.

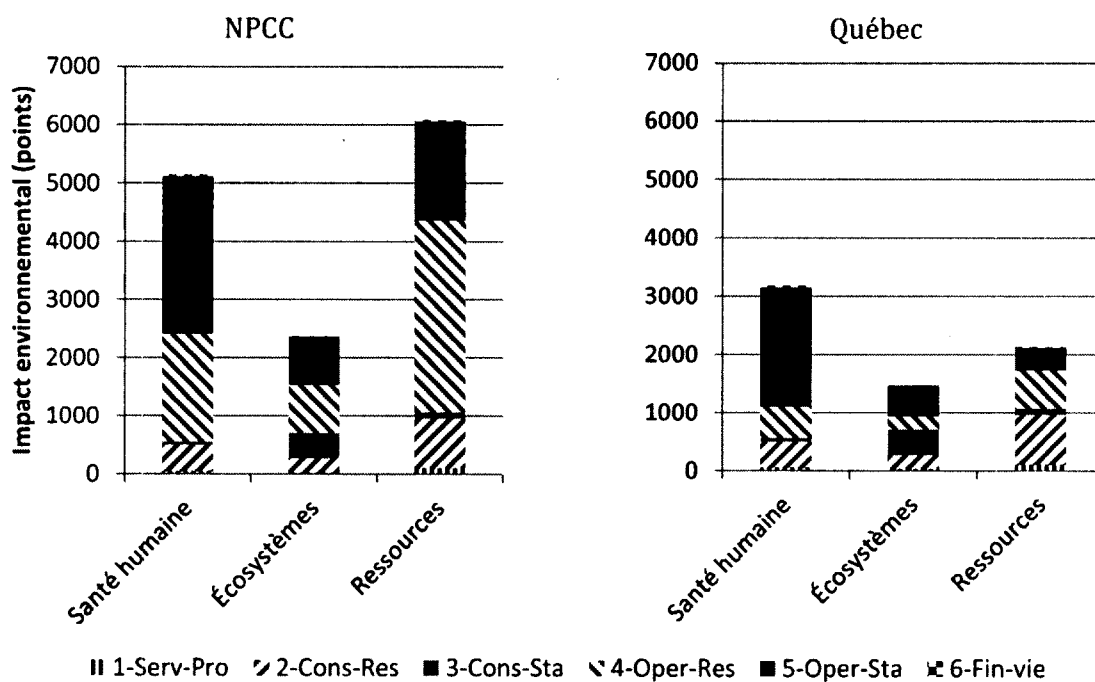


Figure 6.12 Impacts environnementaux normalisés selon ReCiPe

Le choix du mélange énergétique québécois, presque entièrement constitué d'hydroélectricité, réduit grandement les émissions associées à la production d'électricité et diminue par conséquent l'ampleur des impacts totaux pour toutes les catégories d'impacts. La phase de construction engendre ainsi une plus grande partie relative des impacts et s'avère même plus importante que l'opération en ce qui concerne l'effet sur les écosystèmes (construction de la station) et la consommation des ressources (construction du réseau). De plus, l'impact associé à la volatilisation de l'ammoniac et la décomposition des boues surpasse celui de la production d'électricité pour la phase d'opération, sauf en ce qui concerne la consommation des ressources.

Interprétation

Les phases d'opération et de construction du réseau sont celles auxquelles sont associés les principaux impacts environnementaux. Les processus contribuant le plus aux impacts totaux pour chacune de ces phases avec le mélange NPCC sont identifiés au tableau 6.29. Pour la catégorie d'impact sur la santé humaine, la production d'électricité est le principal contributeur, mais les émissions atmosphériques à la station d'épuration (principalement l'ammoniac et le méthane) ont aussi une grande importance. Une forte proportion des impacts sur les écosystèmes est également associée à ces processus, auxquels vient s'ajouter le déboisement du terrain. Pour la consommation des ressources, la production d'électricité ressort clairement comme le principal contributeur avec plus de 70% des impacts totaux.

Tableau 6.29 Principaux processus contributeurs (méthode ReCiPe) avec le mélange NPCC

	Santé humaine	Écosystèmes	Ressources
Opération du réseau	Électricité (33%)	Électricité (31%)	Électricité (49%)
Opération de la station	Électricité (16%) Épuration (31%)	Électricité (15%) Épuration (15%)	Électricité (24%) Alun (2%)
Construction du réseau	Conduites (4%)	Conduites (5%)	Conduites (10%)
Construction de la station	Aucun	Déboisement (17%)	Aucun

Lorsque le mélange énergétique québécois est considéré (tableau 6.30), la contribution relative des processus ayant le plus d'impact est significativement différente de celle évaluée avec le mélange NPCC (tableau 6.29). L'influence de l'électricité est moindre, car le profil du mélange énergétique du Québec est plus propre que celui du NPCC. Par conséquent, les émissions à la station d'épuration et celles découlant de la fabrication des conduites pour le réseau de collecte, qui sont égales en termes absolus, ont une contribution accentuée.

Tableau 6.30 Principaux contributeurs (méthode ReCiPe) avec le mélange québécois

	Santé humaine	Écosystèmes	Ressources
Opération du réseau	Électricité (11,3%)	Électricité (9,0%)	Électricité (14,7%)
Opération de la station	Électricité (5,6%) Épuration (50,3%)	Électricité (4,4%) Épuration (23,7%)	Électricité (7,3%) Alun (6,3%)
Construction du réseau	Conduites (7,1%)	Conduites (8,3%)	Conduites (27,5%)
Construction de la station	Aucun	Déboisement (27,9%)	Aucun

Les impacts potentiels évalués à l'aide de la méthode nord-américaine TRACI 2 sont donnés à l'annexe I. Les résultats concordent avec ceux obtenus avec la méthode ReCiPe, la phase d'opération étant celle ayant le plus grand impact selon l'ensemble des catégories d'impact. Les principaux processus contributeurs sont les mêmes que ceux identifiés précédemment (production d'électricité, émissions atmosphériques à la station et mise en place des conduites). Tel qu'estimé avec ReCiPe, les phases de conception et de fin de vie sont marginales selon la plupart des catégories d'impact.

Des analyses de sensibilité ont été menées sur deux facteurs incertains pour mieux apprécier leur effet sur les résultats, soit la durée de vie des infrastructures et la volatilisation de l'ammoniac. Il a été choisi de faire varier la durée de vie des infrastructures entre 50 et 100 ans. Un scénario complémentaires pour la volatilisation de l'ammoniac à celui défini dans la modélisation a aussi été retenu, basé sur une dénitrification complète et une volatilisation nulle en période de nitrification. La variation induite par ces scénarios par rapport aux résultats initiaux est donnée au tableau 6.31 pour chacun de ces scénarios.

Tableau 6.31 Analyse de sensibilité (méthode ReCiPe) avec le mélange NPCC

	Santé humaine (pts)	Écosystèmes (pts)	Ressources (pts)
Résultats initiaux	5146	2379	6083
Infrastructures 50 ans	5390 (+ 4,7%)	2507 (+ 5,4%)	6535 (+ 7,4%)
Infrastructures 100 ans	5025 (- 2,3%)	2314 (- 2,7%)	5860 (- 3,7%)
100% dénitrification	4873 (- 5,3%)	2376 (- 0,1%)	6083 (- 0,0%)

Alors que la variation de la durée de vie des infrastructures vient surtout influencer l'ampleur des impacts de la phase de construction du réseau de collecte, la variation du taux de dénitrification en période estivale affecte les impacts associés à l'opération de la station. Pour les trois scénarios considérés dans l'analyse de sensibilité, la différence entre les résultats initiaux est peu importante. En effet, l'écart le plus important est de 7,4%, avec le scénario de durée de vie des infrastructures de 50 ans, pour la catégorie d'impact de consommation des ressources.

En dernier lieu, le niveau d'incertitude introduit par l'utilisation de la banque de données MIET est faible. En effet, les processus tirés de cette banque n'apparaissent pas parmi les principaux processus contributeurs et leur somme est inférieure à 10% des impacts totaux pour toutes les catégories d'impact. Outre la volatilisation de l'ammoniac, la dégradation des boues en fond d'étang est aussi un processus quantifié approximativement ayant une influence significative sur les résultats. La caractérisation plus précise de ces phénomènes demanderait toutefois des études dépassant le cadre des présents travaux de recherche.

6.4.2 Analyse des coûts sur le cycle de vie

Les coûts sur le cycle de vie ont été évalués de manière complémentaire à l'AECV et leur analyse comprend quatre phases [Hunkeler et al., 2008]: la définition de l'objectif et du champ d'étude, la collecte de données, l'interprétation et la discussion.

Objectifs et champ d'étude

L'objectif est d'identifier les étapes du cycle de vie du SMAEU de Deauville ayant les coûts les plus importants. L'ACCV est utilisée en parallèle avec l'AECV dans le cadre d'une l'évaluation de la durabilité. La fonction et l'unité fonctionnelle retenues pour l'ACCV sont identiques à celles décrites pour l'AECV. Le champ d'étude diffère pour sa part quelque peu, car les coûts associés à la main d'œuvre et aux intérêts payés sur les emprunts sont inclus.

Collecte des données

La collecte des données pour l'ACCV a été réalisée de manière semblable à l'analyse de l'inventaire pour l'AECV, comme l'indiquent les sources de données énumérées au tableau 6.32.

Tableau 6.32 Sources de données pour l'ACCV

Phase du cycle de vie	Sources de données
Services préalables	Frais contingents prévus selon l'entente gouvernementale.
Construction du réseau et de la station	Estimations des entrepreneurs. Documents de suivi des coûts globaux. Règlements d'emprunt adoptés par les municipalités.
Opération et entretien	Budgets d'opération. Autres coûts fournis par la Ville de Sherbrooke.
Fin de vie	RS Means [2008] pour le démantèlement des infrastructures et Vachon <i>et al.</i> [2009] pour la gestion des matières résiduelles.

Les coûts inclus dans l'ACCV pour les services préalables, la construction ainsi que l'opération et l'entretien correspondent aux montants engagés avant 2008. Pour respecter l'unité fonctionnelle

retenue, soit la collecte et le traitement des eaux usées pour 4726 personnes équivalentes, les coûts d'opération et d'entretien sur l'ensemble du cycle de vie sont estimés à l'aide des coûts d'opération et d'entretien récents (période 2006-2008). Les intérêts payés pour le remboursement des emprunts ont été estimés grâce aux montants figurant aux règlements d'emprunt ainsi que dans les documents de la SQAÉ. Les emprunts octroyés aux municipalités étaient financés sur 20 ans au taux hypothécaire préférentiel sur cinq ans (taux ordinaire moins 1%), tandis que ceux engagés par le gouvernement provincial pour les programmes de subvention étaient financés sur 25 ans à un taux moindre (taux ordinaire moins 2%) [MAMROT, 2009]. Comme il est posé que les travaux de construction ont été réalisés simultanément en 1989, le calcul des intérêts est réalisé comme si les emprunts ont tous été contractés en 1988.

Les coûts futurs pour l'opération et l'entretien ont été estimés à partir des coûts pour la période 2006-2008, eux-mêmes ajustés selon le taux d'inflation. Les projections pour les travaux de construction et la consommation d'électricité tiennent compte des tendances récentes dans ces secteurs, selon un taux supérieur à l'inflation générale (tableau 6.33). Les mêmes hypothèses sur la durée de vie des équipements que celles posées pour l'AECV sont retenues pour l'ACCV, c'est-à-dire une durée de vie de 20 ans pour les équipements mécaniques et une durée de vie de 75 ans pour les infrastructures.

Tableau 6.33 Taux et indices pour les coûts futurs

Taux et indices	Références et périodes couvertes	Valeur retenue pour 2008-2064
CCI (<i>Construction Cost Index</i>)	Selon le <i>Engineering News Record</i> pour la période de 2000 à 2010.	+ 3,5% par an
Tarif d'électricité	Selon le tarif résidentiel d'Hydro-Québec pour la période 2003 à 2013.	+ 2,8% par an
Inflation	Selon la cible de la Banque du Canada. Depuis l'entrée en vigueur de la cible en 1995, le taux moyen d'inflation est de 2%.	+ 2,0% par an

Les coûts associés à la fin de vie sont incertains, car il est difficile de prévoir comment sera démantelé ou réutilisé le SMAEU au milieu du 21^e siècle. Ces coûts ont néanmoins été évalués pour estimer leur importance relative par rapport aux autres étapes du cycle de vie. Les coûts du démantèlement des infrastructures sont tirés de RS Means [2008] tandis que ceux du tri et de l'élimination des matériaux sont basés sur ceux compilés en 2008 pour l'Estrie par Vachon *et al.* [2009]. De manière conservatrice, il est posé que les coûts associés au démantèlement et au tri

des équipements en métal sont compensés par les revenus acquis par la vente des pièces aux recycleurs. Les coûts pour chacune des phases du cycle de vie sont détaillés à l'annexe J.

Interprétation

Les coûts engagés sur le cycle de vie du SMAEU sont présentés à la figure 6.13, regroupés par blocs de cinq ans. L'ensemble des coûts sont exprimés en dollars constants de 2008. Au moment de la construction, les coûts les plus importants sont liés à la mise en place du réseau de collecte, ceux-ci dépassant de loin les coûts de construction de la station et les frais incidents. Le remboursement des emprunts est étalé sur les 25 premières années du cycle de vie et les frais associés sont supérieurs aux coûts d'opération et d'entretien durant cette période. Vu les taux d'intérêt en vigueur à la fin des années 1980 (environ 12%) et au début des années 2000 (environ 7%), 44% des sommes remboursées sont dues aux intérêts. Le réseau s'avère avoir des coûts d'opération et d'entretien plus élevés que la station.

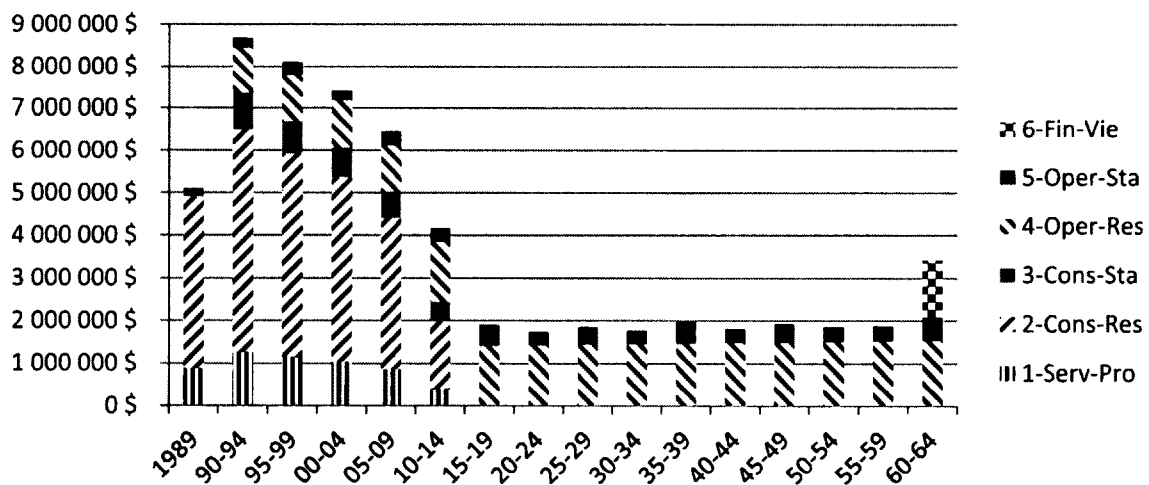


Figure 6.13 Coûts sur cycle de vie en dollars constants (2008)

Les coûts annuels présentés à la figure 6.13 ont été actualisés de manière à pouvoir estimer la part relative de chacune des phases du cycle de vie. Le taux d'actualisation retenu est de 4,5%, soit une valeur intermédiaire entre les taux proposés par Rushing et Lippiatt [2008] (3,0%) et Montmarquette et Scott [2007] (6,0%) pour les investissements réalisés dans le secteur public. Les coûts actualisés du SMAEU selon les principales phases du cycle de vie sont présentés à la figure 6.14. L'influence du taux d'actualisation sur les résultats est traitée lors la discussion.

La construction du réseau de collecte est responsable de plus de la moitié des coûts actualisés avec près de 40M\$. Les services professionnels pour l'ensemble des travaux de construction et l'opération du réseau suivent avec des sommes d'environ 10M\$. La phase d'opération et d'entretien est beaucoup moins coûteuse que la phase de construction.

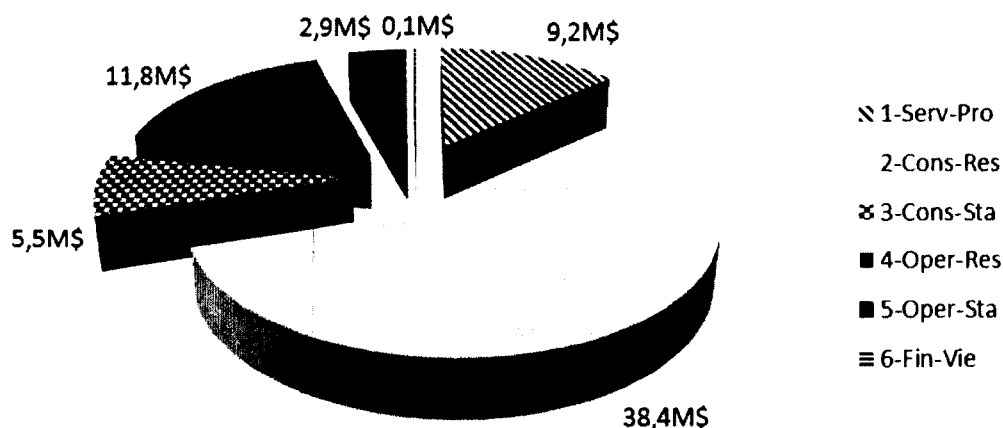


Figure 6.14 Coûts sur le cycle de vie actualisés en dollars constants de 2008

Les sommes allouées à la construction du réseau ont principalement été investies dans le réseau d'égout local (26,7M\$) et dans les infrastructures pour l'interception (10,6M\$). La majorité des intérêts versés sur les emprunts sont par conséquent associés au financement de ces infrastructures. En ce qui concerne la phase d'opération du réseau, les coûts découlent surtout de la main d'œuvre effectuant le suivi, le nettoyage et l'entretien préventif des équipements.

Discussion

Le taux d'actualisation est un paramètre sensible lors de l'étude de systèmes ayant une longue durée de vie et son effet sur les coûts sur le cycle de vie du SMAEU est illustré à la figure 6.15. Le choix d'un taux d'actualisation plus élevé a pour effet d'accorder une plus grande valeur à la phase de construction comme celle-ci survient au début du cycle de vie. La part qui revient à la construction du réseau et au paiement des intérêts est ainsi accentuée avec un taux d'actualisation de 6%. Le choix d'un taux d'actualisation de 3% rehausse pour sa part la proportion des coûts totaux alloués à la phase d'opération. Toutefois, peu importe le taux d'actualisation retenu, les phases du cycle de vie les plus importantes demeurent les mêmes.

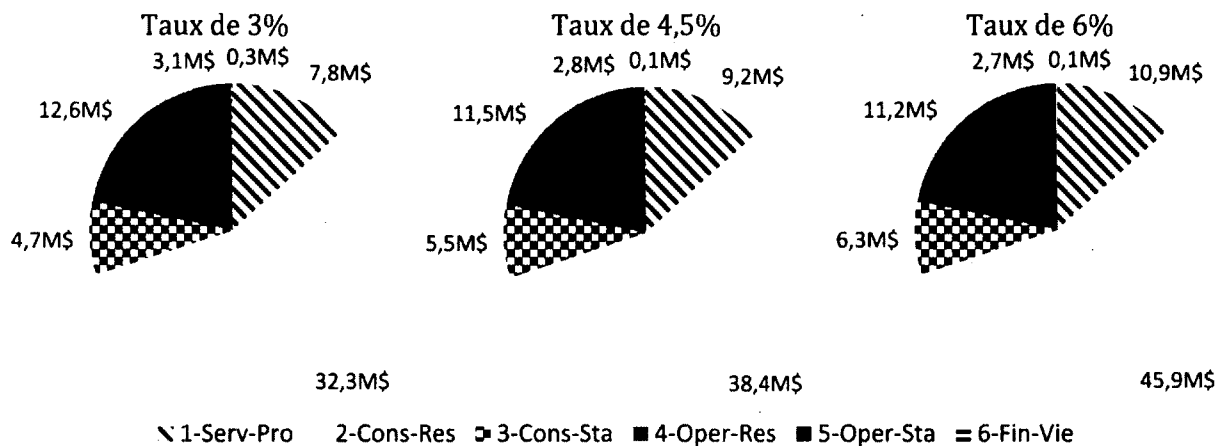


Figure 6.15 Influence du taux d'actualisation sur les coûts sur le cycle de vie

Il subsiste une incertitude quant à l'estimation des coûts futurs, car ceux-ci dépendent des projections retenues pour les secteurs de l'énergie et de la construction. Ceux-ci pourraient donc s'avérer plus élevés ou plus faibles que ceux prévus vu la longue durée de vie du SMAEU. Les coûts actualisés de la phase d'opération et d'entretien sont toutefois moins importants que ceux de la phase de construction. Les coûts de fin de vie, qui ont pour leur part été estimés de manière approximative, s'avèrent avoir une importance négligeable par rapport aux autres coûts.

6.4.3 Analyse de la valeur accordée aux biens et services environnementaux

La technique de l'évaluation des contingences a été utilisée pour estimer la valeur accordée aux biens et services environnementaux préservés par le SMAEU. Des questions avec choix dichotomique à bornes multiples [Wang, 1997], ont été posées pour connaître la volonté de payer (VDP) pour l'amélioration des services ou le consentement à accepter (CAA) l'interruption de ces mêmes services des citoyens dans quatre situations:

- l'amélioration du réseau de collecte (VDP);
- l'amélioration de la qualité de l'eau dans le lac Magog et la rivière Magog (VDP);
- l'interruption pour une période indéterminée du réseau de collecte (CAA);
- l'interruption pour une période indéterminée de la station d'épuration (CAA).

Un échantillon composé de 206 ménages desservis par le SMAEU de Deauville a été sondé à l'automne 2008, une personne par ménage ayant répondu au questionnaire. L'âge de l'ensemble des personnes constituant ces ménages ainsi que leur revenu annuel brut sont comparés à ceux observée dans la population au tableau 6.34. Malgré une surreprésentation des groupes d'âge de

55 à 64 ans et de 65 ans et plus, la distribution de l'âge dans les ménages sondés ressemble à celle observée dans la population. La plupart des groupes de revenu sont représentés de manière adéquate, à l'exception des ménages disposant d'un revenu annuel se situant entre 40 000\$ et 50 000\$ et de ceux ayant un revenu supérieur à 90 000\$. Dans l'ensemble, les ménages disposant d'un revenu brut plus faible sont sous-représentés. Ainsi, la VDP ou le CAA sont susceptibles d'être légèrement surestimés s'ils se révèlent corrélés avec le revenu des ménages.

Tableau 6.34 Distribution de l'âge et du revenu dans l'échantillon et la population

Âge	Échantillon		Population	
	(n)	(%)	(n)	(%)
- de 18 ans	119	22,2	1147	22,9
18 - 24 ans	32	6,0	338	6,7
25 - 34 ans	63	11,8	615	12,3
35 - 44 ans	65	12,1	800	15,9
45 - 54 ans	86	16,1	915	18,2
55 - 64 ans	99	18,5	685	13,7
65 ans et +	71	13,3	515	10,3
Total	535	100	5015	100

Revenu	Échantillon		Population	
	(n)	(%)	(n)	(%)
- de 10k	1	0,6	50	2,6
10k - 20k	6	3,6	125	6,4
20k - 30k	12	7,2	215	11,1
30k - 40k	6	3,6	200	10,3
40k - 50k	15	4,2	270	13,9
50k - 60k	20	12,0	185	9,6
60k - 75k	31	18,7	255	13,2
75k - 90k	24	14,4	250	12,9
90k - 109 k	20	12,0	390	20,1
110k et +	31	18,7		
Total	166	100	1940	100

Selon Wang [1997], les individus ne manifestent pas de préférences claires et la VDP ou le CAA sont plus adéquatement représentés par une fonction de distribution de probabilité allant du « oui » au « non » que par une valeur précise. En supposant une distribution normale, la valeur la plus probable pour la VDP ou le CAA est située au milieu de la distribution et correspond donc aux réponses « peut-être » dans le questionnaire. Pour la quasi-totalité des répondants, peu voire aucune réponse « peut-être » n'a été notée et la VDP était clairement identifiable. La VDP (\$/mois) exprimée par les répondants pour corriger les problèmes relatifs à la collecte des eaux usées et à la qualité de l'eau de la rivière Magog et du lac Magog est donnée au tableau 6.35.

En ce qui concerne l'amélioration du réseau de collecte, la valeur médiane de la VDP est de 20\$/mois. Seulement 23% des répondants ne se considéraient pas déjà très satisfaits et ont été amenés à exprimer une VDP. Les autres répondants ne voyaient aucun problème avec le service rendu par le réseau de collecte et n'ont ainsi pas été questionnés sur son amélioration. En

transposant la valeur obtenue au tableau 6.35 à 23% de la population desservie par le SMAEU, un montant annuel d'environ 70 000\$ pourrait être consacré à l'amélioration du réseau.

Tableau 6.35 Volonté de payer (\$/mois) pour les améliorations (collecte et plans d'eau)

VDP	Nombre	Moyenne	Écart type	Médiane	Minimum	Maximum
Collecte	47	20,90\$	14,90\$	20,00\$	2,50\$	62,50\$
Plans d'eau	183	43,00\$	57,90\$	25,00\$	0,00\$	400,00\$

Une grande proportion des répondants, soit 89%, a identifié au moins un problème avec la qualité de l'eau de la rivière Magog et du lac Magog. Toutefois, la VDP exprimée ne peut directement être allouée à la modernisation de la station, car de nombreuses actions peuvent être mises en place pour accroître la qualité des plans d'eau (la végétalisation des berges, le traitement des eaux pluviales, le contrôle du ruissellement agricole, etc.) La valeur médiane pour l'amélioration de la qualité des plans d'eau est de 25\$/mois. En appliquant cette valeur à 89% de la population desservie par le SMAEU, un montant annuel d'environ 330 000\$ pourrait être dédié à l'amélioration de la qualité des plans d'eau. Sans connaître l'éventail des mesures nécessaires à l'atteinte d'une qualité de l'eau très satisfaisante, il est toutefois difficile de déterminer quelle part de cette somme pourrait être allouée à la modernisation de la station d'épuration. Les CAA (\$/mois) exprimées par les répondants pour tolérer l'interruption de la collecte des eaux usées ainsi que celle de l'épuration des eaux usées sont présentées au tableau 6.36.

Tableau 6.36 Consentement à accepter (\$/mois) une interruption (collecte et épuration)

CAA	Nombre	Moyenne	Écart type	Médiane	Minimum	Maximum
Collecte	153	283,00\$	270,10\$	200,00\$	0,00\$	1000,00\$
Épuration	126	186,40\$	262,40\$	150,00\$	0,00\$	1000,00\$

Une proportion importante des répondants se sont déclarés être dans l'impossibilité d'attribuer une valeur monétaire au CAA pour l'interruption du fonctionnement du réseau de collecte (26%) ou de la station d'épuration (39%). Selon ces répondants, ces situations sont inacceptables et nécessitent la mise en place de correctifs immédiats. Pour les autres répondants, le CAA médian était de 200\$/mois pour le réseau de collecte et de 150\$/mois pour la station d'épuration. Vu la grande variabilité dans les montants exprimés, les médianes sont jugées plus représentatives que les moyennes, car elles sont moins affectées par les valeurs extrêmes. En tenant compte de l'ensemble des ménages desservis, la valeur accordée au service de réseau de collecte est d'environ 3M\$ par année tandis qu'elle est d'environ 2,25M\$ pour la station d'épuration. Ces

valeurs, qui excèdent les coûts annuels actualisés de 0,9M\$ obtenus pour le SMAEU par l'ACCV, illustrent la grande valeur accordée aux services rendus par ce dernier.

La VDP exprimée pour la mise en place d'un réseau de collecte et d'une station d'épuration par les mêmes répondants en 1989 aurait fort probablement été inférieure aux CAA donnés au tableau 6.36. En effet, le CAA demandé pour la perte d'un service dont bénéficie un individu est fréquemment plus élevé que la VDP exprimée en premier lieu pour l'obtention de ce service. Trois principaux facteurs expliquent cette disparité [Venkatachalam, 2002] :

- la VDP est limitée par le revenu tandis que le CAA ne l'est pas;
- certains services peuvent difficilement être substitués par d'autres, ce qui confère une utilité limitée au montant d'argent obtenu pour le consentement à accepter;
- la perte d'un service se voit accordée une plus grande valeur que le gain d'un nouveau service, car une majorité de personnes ont une aversion face à la perte.

La VDP et le CAA sont habituellement représentés comme des fonctions de variables socio-démographiques, de l'attitude envers le bien environnemental préservé et des préférences politiques. La fonction linéaire exprimant la corrélation de la VDP (ou du CAA) avec ces variables est exprimée à l'équation 6.12 [Michaud, 2010]:

$$VDP_i = C + B_x X_i + B_w W_i + \varphi_i \quad (6.12)$$

Où

VDP_i : Volonté de payer du répondant i

C : Constante

X_i : Matrice de variables socio-démographiques et d'attitude envers le bien environnemental

B_x : Facteurs de corrélation pour les variables de la matrice X

W_i : Matrice de variables sur les préférences environnementales ou politiques

B_w : Facteurs de corrélation pour les variables de la matrice W

φ_i : Terme d'erreur

Les variables retenues pour les régressions linéaires réalisées sur les VDP et les CAA sont l'âge, le niveau de scolarité, le revenu annuel brut, la fréquence des activités à proximité ou sur le plan d'eau ainsi que le profil environnemental. Les régressions linéaires sont utilisées pour valider les valeurs obtenues pour les VDP et les CAA, car elles permettent de vérifier si les tendances anticipées sont observées dans l'échantillon [Venkatachalam, 2002]. Par exemple, la VDP est habituellement corrélée positivement avec le revenu, le niveau de scolarité, etc. Les facteurs de

corrélations sont obtenus par régression linéaire multiple et le degré de significativité du coefficient de corrélation est obtenu selon la loi de Student.

Les coefficients de corrélation et le niveau de probabilité de l'hypothèse nulle (aucune corrélation) pour les variables considérées dans les régressions linéaires sur les VDP et les CAA sont donnés à l'annexe K. D'après ces résultats, aucune variable n'apparaît être corrélée de manière significative avec la VDP pour améliorer le réseau. Le faible nombre d'observations explique en partie ce constat. La VDP pour améliorer la qualité des plans d'eau est pour sa part corrélée de manière significative avec le revenu ($p < 1\%$) et la fréquence d'usage des plans d'eau ($p < 10\%$), ce qui est cohérent avec les tendances anticipées. En ce qui concerne les CAA, seul l'âge y est corrélé de façon significative ($p < 5\%$), autant pour l'interruption du service rendu par le réseau que par la station. Parmi les facteurs permettant d'expliquer cette observation, il faut considérer que les répondants plus âgés connaissent probablement mieux les inconvénients associés à l'absence d'infrastructures d'assainissement. En effet, les services de collecte et d'épuration des eaux usées sont répandus au Québec depuis environ 30 ans et les répondants âgés de moins de 40 ans ont probablement eu plus de difficulté à imaginer les conséquences des situations proposées. De plus, il est raisonnable de croire que les personnes plus âgées ont une plus grande aversion à la perte, ce qui a eu pour effet d'accroître leur CAA.

6.4.4 Analyse distributionnelle

La distribution des coûts associés au SMAEU entre les ménages est calculée selon la procédure décrite à la section 5.2.2. Les modes de financement ainsi que la répartition des coûts actualisés (dollars constants de 2008) entre les paliers municipal et gouvernemental sont donnés au tableau 6.37 pour chacune des composantes du SMAEU.

Tableau 6.37 Modes de financement et coûts du SMAEU

Composantes	Partie municipale		Partie gouvernementale			
	Financement	Coûts		Financement	Coûts	
Station	Évaluation municipale	10%	0,7M\$	Taxes et impôts	90%	7,6M\$
Interception		33,3%	4,8M\$		66,7%	12,2M\$
Égout local	Étendue en front	72%	22,3M\$		28%	5,5M\$
Opération	Tarif annuel fixe	100%	16,1M\$	n.a.	0%	n.a.
Fin de vie			0,1M\$			n.a.

Actuellement, il est difficile de prévoir qui assumera les coûts en fin de vie pour le SMAEU. Il est donc supposé que les coûts seront couverts par la municipalité à l'aide du tarif fixe imposé pour

l'opération et l'entretien. L'échantillon pour l'analyse distributionnelle est composé des ménages ayant divulgué leur revenu annuel brut lors du sondage mené auprès des citoyens. Les autres informations nécessaires pour estimer la répartition des coûts (évaluation municipale et étendue en front) ont été obtenues à partir des rôles d'évaluation des villes de Sherbrooke et de Magog disponibles publiquement. Les impôts payés par les ménages ont été estimés à partir du revenu annuel brut ainsi que des paliers d'imposition en vigueur en 2008 au provincial et au fédéral. Les taxes à la consommation payées ont pour leur part été déduites du revenu disponible après impôts, des taux en vigueur pour la TPS et la TVQ en 2008 ainsi que des crédits d'impôts remboursables. L'ensemble des seuils et des taux ayant servis à l'analyse distributionnelle sont disponibles à l'annexe L. Les valeurs moyennes pour le revenu annuel brut, l'évaluation municipale et l'étendue en front pour chacun des quintiles sont présentées au tableau 6.38.

Tableau 6.38 Caractéristiques moyennes des quintiles

	1 ^{er} quintile	2 ^e quintile	3 ^e quintile	4 ^e quintile	5 ^e quintile
Revenu annuel brut	14 925\$	22 777\$	32 731\$	58 187\$	110 000\$
Évaluation municipale	116 500\$	117 800\$	135 800\$	223 100\$	273 600\$
Étendue en front	23,8m	18,4m	25,6m	26,0m	31,8m

Note : Comme aucune borne supérieure n'était spécifiée pour la tranche de revenu la plus élevée, le revenu moyen des ménages composant le 5^e quintile n'est pas connu avec précision, mais est estimé à 110 000\$.

Tel que discuté à la section 6.4.3, les ménages disposant d'un revenu supérieur au revenu médian sont surreprésentés dans l'échantillon. Ainsi, les seuils pour délimiter l'appartenance aux quintiles selon le revenu annuel brut sont basés sur ceux observés dans la population desservie par le SMAEU dans son ensemble. Les coûts moyens défrayés par les ménages dans chacun des quintiles pour la mise en place et l'opération du SMAEU sont illustrés en termes absolus et de manière relative au revenu disponible, respectivement aux figures 6.16a et 6.16b.

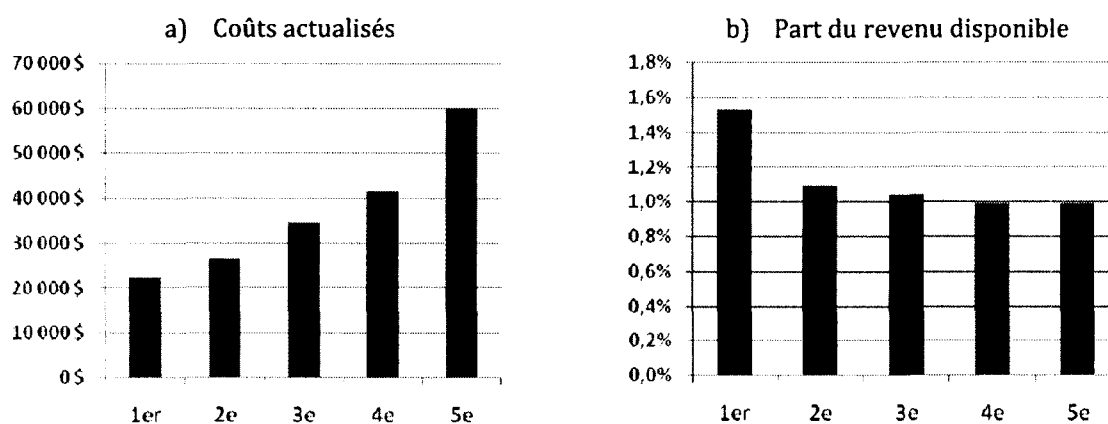


Figure 6.16 Répartition des coûts actualisés sur 75 ans par quintiles

Les ménages disposant d'un revenu plus élevé sont amenés à contribuer de façon plus importante au financement du SMAEU en termes absolus. Cette situation était prévisible car les modes de répartition sont directement (taxes et impôts) ou indirectement (évaluation municipale et étendue en front) reliés à la richesse des ménages. Les ménages disposant d'un revenu plus faible doivent en contrepartie consacrer une part plus importante de celui-ci au financement des infrastructures. Le premier quintile se démarque clairement des autres avec une allocation de 1,5% du revenu. Pour les autres quintiles, la contribution est proportionnelle au revenu disponible, soit entre 1,1% et 1,0% du revenu annuel. Dans son ensemble, le mode de financement du SMAEU serait très légèrement régressif, voire même proportionnel. La contribution des ménages calculée à la figure 6.16 repose sur le portrait de la population en 2008. Il est toutefois raisonnable de croire que ce profil socio-démographique n'a pas grandement changé entre 1989 et 2008 et que cette répartition demeure représentative des coûts réellement assumés par les ménages sur le cycle de vie du SMAEU.

6.4.5 Consultation des parties prenantes

De manière similaire à ce qui a été présenté à la section 6.3.4 pour le volet technique, un groupe de quatre personnes a été consulté pour explorer certains enjeux sociaux propres au SMAEU. La méthodologie retenue pour cette consultation est décrite à la section 5.2.1. L'importance des critères et le respect des critères ont été évalués selon une échelle de type Likert à sept niveaux (0 à 6). L'importance moyenne de chaque critère ainsi que les évaluations sont données au tableau 6.39. Les résultats ne sont donc pas disponibles pour le critère de l'équité, car plusieurs répondants ont déclaré ne pas être en mesure de l'évaluer adéquatement.

Tableau 6.39 Évaluation des critères sociaux par les parties prenantes

Critère	Importance moy. (0-6)	Évaluation (0-6)		
		moy.	min.	max.
S1-Sensibilisation et connaissances	5,8	1,3	0	3
S2-Comportements responsables	5,5	2,5	2	4
S3-Capacité organisationnelle	5,0	3,5	3	4
S4-Nuisances	5,3	2,5	0	5
S5-Équité	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Note : une évaluation élevée pour le critère S4 correspond à un faible degré de nuisances.

Selon les parties prenantes interrogées, tous les critères se situent entre les niveaux important (4) et très important (6). Le critère le plus important est la sensibilisation et les connaissances. Comme toutes les évaluations moyennes se situent sous le seuil de quatre, aucun critère n'est

rempli selon un niveau correspondant à « beaucoup » selon les répondants. Les évaluations les plus basses concernent la sensibilisation et les connaissances ainsi que les comportements responsables. D'importantes divergences quant au niveau de nuisance perçu ont été observées. Les répondants allouant une faible note à ce critère ont insisté sur le caractère désagréable des refoulements d'eaux usées et des odeurs à proximité des postes de pompage. Les répondants ayant accordé une note élevée ont plutôt mentionné que les nuisances ne touchaient qu'un nombre restreint de citoyens. Les critères ayant reçu une évaluation moyenne inférieure à 3 sont énumérés au tableau 6.40, accompagnés des principaux commentaires faits par les répondants.

Tableau 6.40 Commentaires des parties prenantes sur les critères sociaux

Critère	Éval.	Commentaires
S1-Sensibilisation et connaissances	1,5	La plupart des gens ne se posent pas de question sur le fonctionnement ou l'utilité du système.
S2- Comportements responsables	2,5	Certains comportements (branchements illicites, déversements de produits dangereux, etc.) s'expliquent par le manque de connaissances sur le système ou par le peu de soucis de l'environnement.
S4-Nuisances	2,5	Des plaintes sont enregistrées à chaque année pour des refoulements d'eaux usées dans les sous-sols. Les débordements à certains postes de pompes génèrent aussi des nuisances.

Même s'il s'est avéré difficile d'évaluer le critère de l'équité pour les répondants, leurs commentaires à ce sujet ont permis de mieux cerner ses différentes interprétations. Selon certains, il semblait inéquitable que la mise à niveau d'infrastructures en mauvais état à cause du supposé laxisme des anciennes municipalités fusionnées en 2002 soit financée par l'ensemble des citoyens de la nouvelle ville de Sherbrooke. Le lieu de résidence apparaît aussi influencer la répartition des bénéfices engendrés par le SMAEU, car les personnes qui ont un accès direct au lac profitent plus de l'amélioration de la qualité des plans d'eau que ceux n'ayant pas un tel accès. Toutefois, les propriétés situées en bordure des plans d'eau ont une plus haute valeur foncière et leurs propriétaires doivent assumer un coût d'acquisition ainsi que des taxes municipales plus élevés. En dernier lieu, la disposition des équipements sur le territoire influence les nuisances subies, car les citoyens à proximité des postes de pompage sont plus susceptibles d'être affectés par les odeurs ou les refoulements dans les sous-sols.

6.4.6 Sondage mené auprès des citoyens

Lors du sondage mené pour l'évaluation de la valeur accordée aux biens et services environnementaux, des questions sur le niveau de satisfaction envers le service à la collecte des

eaux usées ont été posées. Le niveau de satisfaction par rapport la qualité de l'eau de la rivière Magog et du lac Magog, soit le bien environnemental préservé par le SMAEU, a aussi été étudié. La satisfaction était mesurée selon une échelle par intervalle de type Likert à quatre niveaux. Dans la situation où le répondant n'affichait pas un très haut niveau de satisfaction, il était invité à répondre sur les causes de son insatisfaction. Les résultats pour la satisfaction envers le réseau de collecte sont présentés au tableau 6.41.

Tableau 6.41 Niveau de satisfaction face au réseau de collecte et à la qualité des plans d'eau

Réseau de collecte	n	(%)	Qualité des plans d'eau	n	(%)
Très satisfait (4)	159	77,2	Très satisfait (4)	23	11,1
Relativement satisfait (3)	29	14,1	Relativement satisfait (3)	95	46,1
Relativement insatisfait (2)	7	3,4	Relativement insatisfait (2)	60	29,1
Très insatisfait (1)	4	1,9	Très insatisfait (1)	22	10,7
Ne sait pas/ ne répond pas	7	3,4	Ne sait pas / ne répond pas	6	2,9

Plus de 90% des répondants se sont déclarés relativement satisfaits ou très satisfaits du service rendu par le réseau de collecte des eaux usées. Pourtant, la génération de nuisances par le réseau avait été identifiée comme problématique à la section 6.4.5. Ceci confirme que les nuisances n'affectent qu'un nombre restreint de personnes, bien que le niveau de nuisance soit élevé pour les citoyens devant les subir. Le niveau de satisfaction face à la qualité de l'eau de la rivière Magog et du lac Magog est plus faible que celle exprimée pour le réseau de collecte, mais une majorité de citoyens (57,2%) se déclarent tout de même relativement satisfaits ou très satisfaits. La préservation des usages qui sont fait de la rivière Magog et du lac Magog repose en partie sur le bon fonctionnement du SMAEU, même si la qualité de ces plans d'eau est aussi affectée par d'autres sources de pollution. Les raisons les plus fréquemment mentionnées pour expliquer l'insatisfaction des citoyens vis-à-vis le réseau de collecte et la qualité des plans d'eau sont énumérées au tableau 6.42.

Tableau 6.42 Raisons d'insatisfaction pour le réseau de collecte et la qualité des plans d'eau

Réseau de collecte	Nb	%	Qualité des plans d'eau	Nb	%
Refoulement d'eaux usées au sous-sol	16	8	Contamination empêchant la baignade ou les sports nautiques	19	9
Odeurs près des regards ou des postes de pompage	19	9	Contamination empêchant ou limitant la pêche	21	10
Débordements aux postes de pompage	13	6	Apparence générale de l'eau	92	45
Autres	4	2	Prolifération de cyanobactéries	137	67
			Autres	26	13

Les trois principales causes d'insatisfaction pour le réseau de collecte sont soulevées par un nombre similaires de répondants (entre 6% et 9%) et peu d'autres raisons ont été identifiées. En ce qui concerne la qualité des plans d'eau, l'apparence générale de l'eau ainsi que la présence de cyanobactéries apparaissent clairement comme les problèmes les plus graves. Les commentaires sur l'apparence générale de l'eau portent surtout la présence de plantes aquatiques. Le lac Magog n'est toutefois pas identifié comme un lac eutrophe par le COGESAF [2006]. La présence de ces plantes, bien qu'elle contraste avec les berges artificialisées, est donc probablement normale dans les plans d'eau en question. L'importance accordée à la question des cyanobactéries s'explique, du moins en partie, par le fait que le sondage ait été mené à l'automne 2008, peu après la crise des algues bleu-vert de l'été 2007. La présence de cyanobactéries dans de nombreux plans d'eau au Québec avait alors fait l'objet d'une large couverture médiatique et a éventuellement mené à l'élaboration d'un plan d'intervention par le MDDEP [2011b].

6.4.7 Conclusions

Les analyses menées aux sections 6.4.1 à 6.4.6 ont permis d'évaluer la performance du SMAEU selon une gamme variée de critères de développement durable. D'après les résultats obtenus pour l'AECV, les principaux impacts environnementaux sont associés à la phase d'opération et ceux-ci se sont avérés sensibles au choix du mélange énergétique. En contrepartie, la phase de construction engendre les coûts sur le cycle de vie les plus élevés selon l'ACCV, surtout pour la construction et le financement du réseau. La part relative de chacune de phases du cycle de vie en ce qui concerne les coûts est peu sensible au taux d'actualisation retenu.

Les bénéfices estimés à partir de la valeur accordée par les citoyens aux services rendus par le SMAEU se sont avérés largement supérieurs aux coûts évalués par l'ACCV. Une très forte proportion des citoyens s'est déclarée satisfaite du service rendu par le réseau de collecte tandis qu'une majorité était satisfaite de la qualité de l'eau de la rivière et du lac Magog. Les ménages sondés ont néanmoins exprimé une volonté de payer appréciable pour améliorer la performance du réseau de collecte et la qualité des plans d'eau avoisinants. L'analyse distributionnelle a pour sa part permis d'évaluer que la contribution des ménages au financement du SMAEU était pratiquement proportionnelle à leur revenu. Finalement, les parties prenantes ont identifié la contribution à la sensibilisation et aux connaissances, l'adoption de comportements responsables et la génération de nuisances comme les principaux points faibles du SMAEU. Le portrait complet obtenu pour le SMAEU de Deauville dans sa configuration existante permet maintenant de mettre en œuvre le PICDI en vue de sa modernisation.

Chapitre 7 MODERNISATION DU SMAEU DE DEAUVILLE

L'analyse technique du système municipal d'assainissement des eaux usées (SMAEU) de Deauville, réalisée au chapitre 6, a mis en évidence que celui-ci était actuellement exploité à sa pleine capacité. Des interventions sont ainsi nécessaires pour que le SMAEU soit en mesure de desservir adéquatement un plus grand nombre de citoyens. Le chapitre 7 de la thèse porte de l'application du processus intégré de conception durable pour l'ingénierie (PICDI) au projet de modernisation du SMAEU de Deauville. Les trois premières étapes du PICDI (définition du problème, analyse conceptuelle et conception préliminaire) sont réalisées en accordant une attention particulière aux tâches propres à la conception durable, car l'originalité de la recherche repose sur celles-ci. Les tâches relatives à la conception conventionnelle sont effectuées dans une perspective différente, soit poser des bases techniques réalistes pour les solutions proposées. Par conséquent, la réalisation de ces dernières est décrite avec un niveau de profondeur moindre.

L'existence de deux écoles de pensée en ce qui concerne le rôle des SMAEU dans le développement urbain durable a été soulevée à la section 2.6.2. Selon la première, il est possible de modifier les systèmes centralisés existants pour qu'ils contribuent de manière significative au développement durable, tandis que la seconde avance que ceux-ci doivent être remplacés par des systèmes décentralisés. Comme le SMAEU de Deauville a été mis en place il y a 20 ans, une reconfiguration radicale n'est pas envisageable pour le moment. Ainsi, les options proposées pour la modernisation du SMAEU s'inscrivent dans une optique d'optimisation des systèmes centralisés. L'application du PICDI permet néanmoins de cerner les limites d'une telle approche et de tracer les contours d'interventions pertinentes à plus long terme.

7.1 Définition du problème

Les tâches réalisées durant la première étape du PICDI sont la définition du problème et des objectifs, l'élaboration des principes et du cadre conceptuel, la définition du contexte, l'analyse des parties prenantes, l'identification des enjeux associés au développement durable, l'identification des contraintes et l'identification des données de base.

7.1.1 Définition du problème et des objectifs

Les problèmes ayant initialement mené à la mise en place du SMAEU sont, d'une part, les nuisances associées à l'évacuation désordonnée des eaux usées et d'autre part, la perte des usages des cours d'eau où sont déversées les eaux usées non traitées. Dans sa configuration

actuelle, le SMAEU est exploité à la limite de sa capacité. Le branchement d'un nombre significatif de bâtiments supplémentaires compromettrait ainsi le bon fonctionnement du réseau de collecte et de la station d'épuration, ce qui aurait pour effet de contribuer à la résurgence des problèmes cités précédemment. L'objectif principal du projet est de moderniser le SMAEU de Deauville pour assurer la protection de la santé humaine et l'intégrité des écosystèmes dans le contexte où le périmètre d'urbanisation est élargi pour permettre le développement résidentiel.

7.1.2 Élaboration des principes et du cadre conceptuel

La liste des principes de développement durable retenue est celle décrite à la section 3.3, tandis que le cadre conceptuel correspond à celui élaboré à la section 3.5. Les principes et le cadre conceptuel servent notamment à la section 7.1.5 pour de l'identification des enjeux du développement durable associés au SMAEU de Deauville.

7.1.3 Définition du contexte

Les bâtiments desservis par le SMAEU de Deauville sont pour la plupart situés en bordure du lac Magog ou de la rivière Magog. Le réseau de collecte rejoint également quelques industries et commerces situés en bordure des principaux axes routiers. La station d'épuration est pour sa part localisée près de la branche Nord de la rivière Magog. L'étendue du territoire desservi par le SMAEU et l'emplacement de la station d'épuration ont été clairement illustrés à la section 6.2. Les sous-bassins du réseau de collecte sont principalement à vocation résidentielle. Quelques industries, commerces et institutions (ICI) sont également branchés au réseau. Le territoire dédié à l'agriculture près du lac Magog est pour sa part exclu du périmètre d'urbanisation. L'importance relative des résidences et des ICI en termes de population équivalente a été exposé à la section 6.2.1, tout comme les technologies utilisées pour la collecte et le traitement des eaux usées. La Ville de Sherbrooke [2010] a ciblé des zones prioritaires ainsi que des zones de réserve pour le développement résidentiel sur le territoire desservi par le SMAEU. Ces zones sont identifiées à la figure 7.1. Il subsiste également un potentiel de développement dans le périmètre d'urbanisation actuel, car certains terrains sont vacants. L'extension du périmètre d'urbanisation n'est pas envisagée pour les sous-bassins situés sur le territoire de la ville de Magog.

La population ultime est projetée à la section 7.1.7 lors de l'identification des données de base. L'analyse des résultats de l'enquête menée auprès des citoyens à la section 6.4.3 a mis en évidence certaines disparités socio-économiques dans la population. Ainsi, des ménages au revenu élevé, résidant en bordure des plans d'eau, côtoient des ménages dont le revenu est

moyen ou faible. La distribution de la population entre les principaux groupes d'âge observée sur le territoire était semblable à celle prévalant dans la région métropolitaine de Sherbrooke.

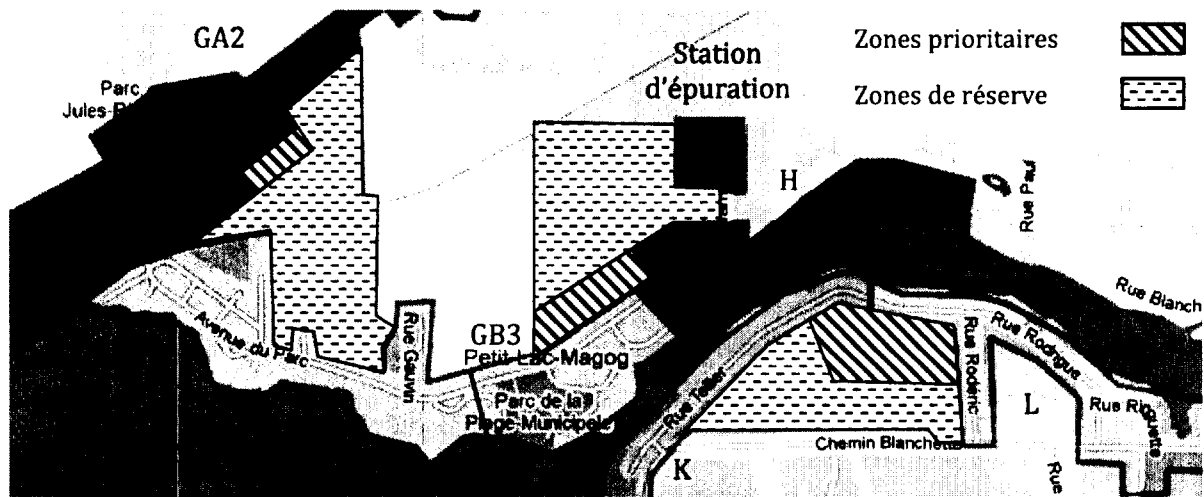


Figure 7.1 Zones prioritaires et zones de réserve pour le développement

Le territoire couvert par le SMAEU est situé dans le bassin versant de la rivière Magog, ce dernier faisant lui-même fait partie du bassin versant de la rivière Saint-François. Depuis l'adoption de la Politique nationale de l'eau par le gouvernement du Québec en 2002, le comité de gestion du bassin versant de la rivière Saint-François (COGESAF) est responsable de la gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant. Outre le SMAEU, le réseau de drainage urbain fait aussi partie des infrastructures urbaines ayant une incidence sur la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant de la rivière Magog. Or, la contribution des eaux de ruissellement à la dégradation de la qualité de l'eau de la rivière et du lac Magog n'est pas caractérisée par la Ville de Sherbrooke ou le COGESAF. Néanmoins, l'absence d'égout pluvial sur une grande partie du territoire a eu pour conséquence le branchement des drains de fondation à l'égout sanitaire dans plusieurs résidences, ce qui résulte en un débit de captage indirect élevé.

7.1.4 Analyse des parties prenantes

Le rôle des organisations impliquées dans la gestion du SMAEU a été décrit à la section 6.2. Leurs intérêts, pouvoirs et contribution potentielle au développement durable, ainsi que ceux des autres parties prenantes sont maintenant abordés, selon la méthode présentée à la section 5.2.2 pour l'analyse des parties prenantes. Les caractéristiques des parties prenantes primaires sont présentées au tableau 7.1 tandis que celles des parties prenantes secondaires le sont au tableau 7.2. Les relations existant entre ces parties prenantes sont discutées à la suite des tableaux.

Tableau 7.1 Analyse des parties prenantes primaires

Parties prenantes	Intérêts	Pouvoirs	Potentiel D.D.
1. Ville de Sherbrooke	Le développement résidentiel, commercial et industriel. La satisfaction des citoyens envers les services. L'équilibre des finances publiques.	Fixer les taxes et tarifs municipaux. Planifier les investissements dans les infrastructures. Établir et faire respecter les règlements municipaux.	Une politique de développement durable a été adoptée en 2007. Les mesures en découlant sont surtout de nature environnementale.
2. Ville de Magog	Mêmes que pour la Ville de Sherbrooke.	Mêmes que ceux de la Ville de Sherbrooke.	Aucune approche stratégique.
3. MDDEP	La protection de l'environnement et la conservation de la biodiversité. Contribuer aux priorités gouvernementales.	Appliquer les lois et règlements (autorisation de l'extension des services municipaux et valorisation des matières résiduelles fertilisantes).	Adoption d'un plan d'action ministériel de développement durable en 2009, découlant de la stratégie gouvernementale québécoise.
4. MAMROT	Appuyer l'administration et le développement des municipalités et des régions. Contribuer aux priorités gouvernementales.	Appliquer les lois et règlements, notamment pour le suivi des ouvrages d'assainissement. Gérer les programmes d'investissement.	Même que pour le MDDEP.
5. ICI	La satisfaction des besoins des clients. Les profits (secteur privé) ou l'équilibre budgétaire (secteur public).	Influence sur les pouvoirs publics (Chambre de commerce, Commission scolaire, etc.)	Aucune ICI engagée dans une démarche de développement durable.
6. Citoyens	La qualité de vie. La capacité de payer.	Droit de vote et implication dans les comités citoyens.	Engagement variable d'un citoyen à l'autre.
7. Techniciens et opérateurs	Un travail agréable et sécuritaire. Une rémunération convenable.	Intervention sur les paramètres d'opération du SMAEU.	Engagement variable par rapport à la politique de la Ville.
8. Usagers des plans d'eau	Profiter des plans d'eau pour réaliser leurs activités.	Influence des associations de préservation des cours d'eau.	Engagement variable d'un citoyen à l'autre.

Les relations entre les parties prenantes primaires sont pour l'essentiel centrées autour de la Ville de Sherbrooke. Le MDDEP et le MAMROT sont également appelés à collaborer sur différents dossiers de nature municipale. De plus, les citoyens sont les principaux partenaires des ICI, à titre d'employés et de consommateurs ou même de parents et d'étudiants en ce qui concerne l'école primaire située à Deauville. Ceux-ci sont également les principaux usagers des plans d'eau car ils habitent à proximité. La plupart des parties prenantes secondaires ne sont pas en interaction fréquente avec la Ville de Sherbrooke et le sont encore moins avec les parties prenantes primaires. La Ville de Sherbrooke est néanmoins directement impliquée avec les firmes de génie-

conseil lors de l'attribution de certains mandats ou avec les associations de riverains lorsque des problèmes en qui concerne la qualité des plans d'eau surviennent.

Tableau 7.2 Analyse des parties prenantes secondaires

Parties prenantes	Intérêts	Pouvoirs	Potentiel D.D.
1. Firmes de génie-conseil et fournisseurs	La satisfaction des besoins des clients ainsi que la profitabilité. Une vitrine pour leurs produits et services.	Fixer la gamme des équipements et des services qui sont offerts aux clients. Contrôle du savoir et du savoir-faire.	Certaines entreprises dans le secteur de l'eau ont commencé à intégrer le développement durable à leurs activités.
2. COGESAF	La protection de l'environnement, l'aménagement et le développement durable du territoire.	Établir le plan directeur de l'eau et faire appliquer les contrats de bassin pour la rivière Saint-François.	De nombreux axes d'intervention du plan directeur font référence au développement durable.
3. Associations de riverains	Protéger la qualité des cours d'eau situés en bordure des résidences.	Influence sur les pouvoirs publics et visibilité dans les médias. Influence sur les autres citoyens.	Engagement variable d'une organisation à l'autre.
4. Clients de matières résiduelles fertilisantes (MRF)	L'approvisionnement abordable en matières fertilisantes de qualité.	Accepter ou non de d'utiliser des MRF telles les boues d'épuration.	Engagement variable d'un client à l'autre.
5. Bureau de normalisation du Québec	La production de produits et services de qualité.	Certifier des produits (regards, MRF, etc.) Encadrer des activités (pose des conduites).	Élaboration d'une norme sur la gestion du développement durable dans les organisations.
6. Environnement Canada	La préservation de l'environnement et la conservation des ressources. Contribuer aux priorités gouvernementales.	Appliquer les lois et règlements, notamment pour le rejet de polluants dans les cours d'eau.	Adoption d'une stratégie ministérielle de développement durable.
7. Infrastructure Canada	La mise en place d'infrastructures publiques de qualité. Contribuer aux priorités gouvernementales.	Gérer les programmes d'investissement.	Aucun engagement.

7.1.5 Identification des enjeux associés au D.D.

La définition des enjeux associés au développement durable repose sur la revue de littérature sur les enjeux, critères et indicateurs propres au domaine de l'assainissement des eaux usées (section 2.6). Les enjeux ainsi recensés sont complétés par ceux identifiés à l'aide des principes de développement durable et du cadre conceptuel (annexe M). Leur synthèse est présentée au tableau 7.3 selon les trois dimensions et interfaces du développement durable. Parmi la gamme d'enjeux recensés et identifiés, ceux au tableau 7.3 ressortent comme les plus importants. Les liens entre ces enjeux et les critères d'évaluation sont discutés à la section 7.2.3.

Tableau 7.3 Enjeux associés au développement durable pour le SMAEU

Dimensions	Enjeux
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • L'impact local lors de la construction. • La destruction d'habitats due à l'occupation du territoire par les infrastructures. • L'impact sur les écosystèmes dû aux émissions sur le cycle de vie.
Environnement et économie	<ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation efficace des ressources renouvelables et non-renouvelables. • Le remplacement des ressources non-renouvelables par des alternatives renouvelables. • L'évaluation des externalités et leur intégration aux coûts.
Économie	<ul style="list-style-type: none"> • La valorisation des ressources présentes dans les eaux usées. • La maximisation des bénéfices résultant de l'opération du SMAEU. • La minimisation des coûts de la mise en place, l'opération et la fin de vie du SMAEU. • La capacité de payer des citoyens.
Économie et société	<ul style="list-style-type: none"> • L'impact du mode de financement sur la distribution des coûts. • Le développement des compétences des employés. • La qualité des emplois directs (conditions de travail, santé et sécurité). • La qualité des emplois créés tout au long de la chaîne d'approvisionnement. • La volonté de payer des citoyens.
Société	<ul style="list-style-type: none"> • Les comportements des citoyens. • La volonté des citoyens à adopter de nouveaux comportements. • Le niveau de connaissances des citoyens sur le fonctionnement du SMAEU. • La capacité des organisations responsables à faire respecter les règlements. • La capacité à impliquer les parties prenantes dans le processus décisionnel.
Société et environnement	<ul style="list-style-type: none"> • La gestion du risque issu de la valorisation des sous-produits dérivés des eaux usées. • L'importance accordée par la population à la préservation de l'environnement. • Les nuisances engendrées par le SMAEU. • L'impact sur la santé dû aux émissions sur le cycle de vie.
Technique	<ul style="list-style-type: none"> • L'influence de l'aménagement du territoire sur la configuration du SMAEU. • La dépendance des concepteurs et des gestionnaires face aux fournisseurs. • L'intégration de nouvelles technologies aux projets réalisés. • L'acquisition d'information sur le fonctionnement du SMAEU.

7.1.6 Identification des contraintes

L'emplacement des composantes du SMAEU existant et la topographie imposent certaines contraintes physiques. Comme les nouveaux branchements sont dispersés sur le territoire desservi, il est impossible de réaliser l'extension du SMAEU par l'ajout d'un seul secteur disposant d'un traitement décentralisé. Les nouveaux équipements doivent aussi être situés près des équipements actuels, sur des terrains appartenant autant que possible à la Ville de Sherbrooke. De plus, la collecte gravitaire des eaux usées dans les nouveaux quartiers n'est possible que si des pentes suffisantes sont présentes. Des contraintes de nature technique sont aussi associées aux équipements existants. En premier lieu, les branchements additionnels doivent être compatibles avec les technologies utilisées dans chacun des sous-bassins (gravitaire,

sous vide ou basse pression). Ensuite, toute modification aux postes de pompage doit être réalisée en fonction des pompes et des conduites en place. Finalement, les ajouts à la chaîne de traitement des eaux usées doivent tenir compte de la capacité et de la configuration des équipements existants.

Les contraintes financières sont diverses mais influencent toutes la faisabilité du projet. Tout d'abord, les investissements dans les infrastructures doivent être inscrits au plan triennal d'immobilisation, puis être approuvés par le Conseil municipal dans le budget de l'année durant laquelle les travaux ont lieu. L'appui financier des gouvernements provincial ou fédéral dépend pour sa part des programmes d'investissements en vigueur au moment de la réalisation du projet. Si des effets significatifs sur les taxes ou les tarifs imposés par la municipalité sont prévus, la capacité de payer des ménages doit aussi être prise en compte. De nombreuses contraintes légales ou normatives ont également un effet sur le déroulement du projet. Ainsi, tout projet d'extension des services d'égout et de construction ou de modification d'un système de traitement doit être autorisé par le MDDEP. Évidemment, les travaux de construction doivent être effectués dans le respect des codes et normes en vigueur. Le suivi des ouvrages ainsi que le respect des exigences font aussi l'objet d'un encadrement gouvernemental.

Finalement, des contraintes de nature sociale ou politique sont susceptibles d'affecter le déroulement du projet. La résistance au changement peut freiner l'adoption de nouveaux comportements chez les citoyens ou rendre difficiles des interventions dans les résidences. De plus, il peut s'avérer ardu d'expliquer la nécessité ainsi que les avantages et inconvénients des interventions proposées, vu le faible niveau de connaissance des citoyens sur le fonctionnement du SMAEU. L'intérêt limité des citoyens envers l'assainissement des eaux usées complique aussi la tâche des conseillers municipaux qui souhaitent défendre des interventions peu populaires.

7.1.7 Identification des données de base

La population projetée est calculée sur la base d'une pleine occupation du périmètre d'urbanisation actuel ainsi que des zones prioritaires de développement (tableau 7.4). Les détails pour chaque sous-bassin sont disponibles à l'annexe O. Les terrains vacants dans le périmètre d'urbanisation actuel sont principalement situés dans les sous-bassins D et F, tandis que les zones prioritaires de développement se retrouvent dans les sous-bassins GA2, GB3, K et L. La croissance estimée de la population équivalente, soit 11,8%, est compatible avec les projections

faites par l'Institut de la statistique du Québec [2009] pour l'ensemble de la région métropolitaine de recensement de Sherbrooke, soit une hausse de 12,1% d'ici 2031.

Tableau 7.4 Population actuelle et projetée pour le réseau de collecte

Actuel (2008)			Ajouts			Projeté		
Résidences	ICI	Total	Résidences	ICI	Total	Résidences	ICI	Total
3906	820	4726	562	55	536	4478	875	5286

Les charges polluantes futures sont estimées à partir des valeurs observées à l'affluent de la station d'épuration entre 2003 et 2008. Lorsque ces valeurs sont inférieures à celles proposées par le MDDEP [2011a], une valeur intermédiaire est retenue. Ceci permet de refléter les particularités du territoire tout en conservant une certaine marge de manœuvre. Un tel ajustement a été effectué pour la DBO_5 et le P_T . Les charges totales projetées au tableau 7.5 sont calculées à partir des charges par personne et de la population équivalente projetée.

Tableau 7.5 Charges actuelles et projetées pour la station d'épuration

	Observé (2003-2008)	MDDEP [2011a]	Projeté	
	(g/p.d)	(g/p.d)	(g/p.d)	(kg/d)
DBO_5	41,5	50	45	238
MES	63,1	60	60	317
NTK	8,9	10	10	53
P_T	1,4	2	1,6	8,5

Le débit domestique projeté par personne est estimé de manière similaire aux charges. Celui-ci est fixé à une valeur intermédiaire entre le débit observé de 2005 à 2008 et le débit de 225 L/p.d proposé pour les quartiers résidentiels par le MDDEP [2011a]. Les débits parasites projetés pour les nouveaux branchements sont égaux à ceux évalués à la section 6.3.1 pour le système existant. Les débits totaux au tableau 7.6 sont calculés à partir des valeurs par personne et de la population équivalente projetée.

Tableau 7.6 Débits actuels et projetés pour la station d'épuration

	Actuel		Projeté	
	L/p.d	m ³ /d	L/p.d	m ³ /d
Domestique	177	836	200	1057
Captage direct	5	25	5	26
Captage indirect	21	98	21	111
Infiltration (GA1 et GA2 actuel)	171	202	171	202
Infiltration (GA1 et GA2 exclus)	130	461	130	533
Total		1632		1930

Les débits du tableau 7.6 correspondent à la situation de référence, c'est-à-dire sans autre intervention que le programme de débranchement des gouttières. Cependant, une des solutions retenues pour la modernisation vise à réduire le débit de captage indirect par le débranchement des drains de fondation. La réduction du débit parasite envisageable grâce à cette mesure est estimée lors de la conception préliminaire à la section 7.3.

7.2 Étude conceptuelle

L'étude conceptuelle correspond à la seconde étape du PICDI et comprend la définition des fonctions, la description d'une situation future durable, la définition des spécifications techniques et des critères de développement durable, la génération des options, le choix des indicateurs et des outils de développement durable ainsi que le choix d'une approche d'aide à la décision.

7.2.1 Définition des fonctions

L'analyse fonctionnelle a permis d'identifier deux fonctions principales et quatre fonctions secondaires pour le SMAEU (tableau 7.7). La capacité des options à remplir ces fonctions est évaluée à l'aide de spécifications techniques lors de la conception préliminaire (section 7.3). D'autres attributs qui ne découlent pas des fonctions, mais qui affectent tout de même la performance du SMAEU sont aussi considérés.

Tableau 7.7 Fonctions principales et secondaires du SMAEU

Fonctions principales	Fonctions secondaires
Protéger la santé publique	Assurer la salubrité à proximité des bâtiments desservis.
	Préserver les usages de la rivière Magog et du lac Magog ayant une incidence sur la santé pour les riverains et les autres utilisateurs.
Préserver l'intégrité des écosystèmes	Préserver les usages de la rivière Magog et du lac Magog affectés par l'état des écosystèmes aquatiques.
	Protéger les organismes vivants aquatiques et terrestres de la rivière Magog et du lac Magog.

7.2.2 Description d'une situation future durable

Les principes du développement durable identifiés à la section 3.5 sont employés pour déduire les caractéristiques des SMAEU durables au tableau 7.8. La mise en place d'un SMAEU possédant toutes ces caractéristiques et qui respectant les spécifications techniques est considérée comme une situation entièrement durable, donc idéale.

Tableau 7.8 Caractéristiques des SMAEU durables

Principes	Caractéristiques
1- Préserver la biodiversité en considérant les impacts potentiels des projets sur leur cycle de vie	La construction des infrastructures préserve les habitats existants et permet d'en créer de nouveaux.
2- Maintenir les impacts des projets dans la limite de la capacité de support des écosystèmes affectés	Sur l'ensemble de son cycle de vie, le SMAEU génère des émissions cinq fois inférieures dans l'air, dans l'eau et au sol, à tout le moins, que les SMAEU actuels (voir section 4.5).
3- Éviter les ressources non-renouvelables et respecter le taux de régénération des ressources renouvelables	Le SMAEU n'exige aucune ressource non-renouvelable (minerais, hydrocarbures, etc.) sur son cycle de vie. Les ressources renouvelables nécessaires au SMAEU (énergie, matériaux, etc.) sont exploitées en deçà de leur seuil de régénération.
4- Augmenter l'efficacité des activités de production et de consommation	Sur l'ensemble de son cycle de vie, le SMAEU a une consommation en énergie et en ressources cinq fois inférieure (tableau 4.9), à tout le moins, que les SMAEU actuels.
5- Supporter l'innovation pour assurer la production continue de biens et services de qualité	Le SMAEU permet la validation de technologies qui ne sont pas employées actuellement.
6- Vérifier que les bénéfices totaux générés sur le cycle de vie de projets surpassent les coûts encourus	Les bénéfices tirés de l'exploitation des ressources contenues dans les eaux usées couvrent les coûts du SMAEU.
7- Considérer l'impact des projets sur le marché du travail et sur la qualité des emplois	Le SMAEU crée des emplois de bonne qualité (salaire, santé et sécurité, bien-être, etc.) autant lors de la conception, la construction, l'opération, l'entretien que la fin de vie.
8- Distribuer de manière équitable les bénéfices et les coûts résultant des projets	Les coûts et les bénéfices résultants de la mise en place du SMAEU sont répartis entre les usagers selon un mode considéré équitable par l'ensemble des parties prenantes.
9- S'assurer que les projets contribuent au développement des individus et communautés impliqués	La conception, la construction et l'opération du SMAEU s'inscrit dans une perspective de formation continue chez les organisations concernées.
10- Aider les clients à distinguer besoins et désirs pour viser un réel accroissement de la qualité de vie	La configuration du SMAEU est centrée sur les fonctions primaires devant être remplies pour répondre aux besoins exprimés par les citoyens.
11- Contribuer à un environnement sain et sécuritaire tout au long du cycle de vie des projets	Le SMAEU ne génère aucun risque significatif (santé et sécurité) lors de sa mise en place et sa fin de vie (travailleurs de la construction) ainsi que lors de son opération (citoyens et employés).
12- Diffuser l'information relative aux impacts des projets pour sensibiliser et responsabiliser	Le fonctionnement du SMAEU est bien compris par les citoyens et ceux-ci adoptent des comportements permettant de minimiser les coûts, les impacts environnementaux et les nuisances.
13- Appliquer le principe de précaution si un projet menace la société ou l'environnement	La valorisation des sous-produits du SMAEU respecte le principe de précaution. Seules des substances dégradables sont dirigées au SMAEU pour réduire les risques à la santé et aux écosystèmes.
14- Solliciter la participation de parties prenantes et de plusieurs professionnels pour en venir à des solutions holistiques	Différentes disciplines (chimie, biologie, économie, psychologie, etc.) sont intégrées pour proposer des solutions répondant aux besoins. Le bon fonctionnement du SMAEU est assuré par des approches complémentaires (technique, gestion, éducation, etc.)
15- Identifier, évaluer et internaliser les externalités lorsque possible	Les tarifs exigés tiennent compte des débits acheminés au réseau de collecte ainsi que de la composition des eaux usées.

Les caractéristiques des SMAEU durables servent à orienter la recherche de solutions et permettent de fixer les teintes de durabilité pour certains des critères considérés lors de l'évaluation des options à la section 7.3.

7.2.3 Définition des spécifications techniques et des critères

L'ensemble des critères et spécifications techniques ainsi que les outils servant à leur évaluation ont été énumérés au tableau 5.4. Ils visent le respect des exigences ainsi que la contribution à la fiabilité, la robustesse et la flexibilité. Les exigences projetées à la station sont présentées au tableau 7.9. Elles sont basées sur les exigences actuelles pour la DBO₅ et les coliformes fécaux et incluent l'exigence révisée sur le phosphore. Les exigences du projet de règlement d'Environnement Canada [2010a] sur les MES et l'azote ammoniacal non ionisé sont aussi retenues. Les exigences projetées pour les ouvrages de surverse sont les mêmes que celles présentement en vigueur. Ainsi, les débordements n'y sont permis qu'en cas d'urgence.

Tableau 7.9 Exigences de rejet projetées à la station

Paramètre	Période	Charge (kg/d)	Concentration (mg/L)	Rendement (%)
DBO ₅	01/01 - 31/03	37	20	80
	01/07 - 30/09	19	15	90
	Année	26	20	85
MES	Année	n.a.	25	n.a.
PT	Année	1,3	0,8	80
NH ₃	Année	n.a.	1,25	n.a.
Coliformes fécaux	01/06 - 31/10	n.a.	Moyenne géométrique 2000 UFC/100ml	n.a.

Les options envisagées pour la modernisation du SMAEU sont dimensionnées pour assurer le respect des exigences à la station et aux ouvrages de surverse. Les trois autres critères techniques, soit la fiabilité, la robustesse et la flexibilité, sont définis conformément à la revue de littérature réalisée à la section 2.6.3. La fiabilité dépend de la capacité du système à fonctionner adéquatement dans les conditions prévues à la conception sur sa durée de vie. La robustesse correspond pour sa part à la capacité du système à maintenir son niveau de performance malgré la variabilité des conditions extérieures. En dernier lieu, la flexibilité est liée à la facilité avec laquelle le système peut être adapté pour faire face aux changements de besoins ou d'exigences. Les options proposées pour le réseau de collecte sont évaluées séparément de celles envisagées pour la station d'épuration.

Tout comme les critères techniques, les critères de développement durable sont inspirés de la revue de littérature résumée à la section 2.6.3. D'autres facteurs, adaptés de Bossel [1999], ont aussi été considérés dans l'élaboration de la liste de critères du tableau 7.10. Ainsi, toutes les dimensions du développement durable sont prises en compte, le nombre de critère assure la faisabilité de l'évaluation et de la prise de décision, les outils permettant leur évaluation sont disponibles et l'effort consacré à leur évaluation respecte le principe de proportionnalité. Les liens entre les critères et les enjeux identifiés à la section 7.1.5 sont énumérés au tableau 7.10. La plupart des enjeux ciblés sont traités par les critères retenus.

Tableau 7.10 Critères et enjeux de développement durable

Dimension	Critère	Enjeux
Environnement	Utilisation des ressources non renouvelables sur le cycle de vie (-)	<ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation efficace des ressources renouvelables et non-renouvelables.
	Impact sur les écosystèmes sur le cycle de vie (-)	<ul style="list-style-type: none"> • La destruction d'habitats due à la mise en place des infrastructures. • L'impact sur les écosystèmes dû aux émissions sur le cycle de vie.
	Impact sur la santé humaine sur le cycle de vie (-)	<ul style="list-style-type: none"> • L'impact sur la santé dû aux émissions sur le cycle de vie.
Économie	Coûts de conception et de construction (-)	<ul style="list-style-type: none"> • La minimisation des coûts associés à la mise en place, l'opération et la fin de vie du SMAEU.
	Coûts d'opération et d'entretien (-)	<ul style="list-style-type: none"> • La maximisation des bénéfices résultant de l'opération du SMAEU. • La minimisation des coûts associés à la mise en place, l'opération et la fin de vie du SMAEU.
	Coûts de fin de vie (-)	<ul style="list-style-type: none"> • La minimisation des coûts associés à la mise en place, l'opération et la fin de vie du SMAEU.
	Respect de la volonté de payer (+)	<ul style="list-style-type: none"> • La volonté de payer des citoyens.
Société	Nuisances (-)	<ul style="list-style-type: none"> • Les nuisances engendrées par le SMAEU.
	Développement professionnel (+)	<ul style="list-style-type: none"> • Le développement des compétences des employés.
	Comportements responsables (+)	<ul style="list-style-type: none"> • Les comportements des citoyens (substances rejetées, branchement au réseau, etc.)
	Acceptabilité (+)	<ul style="list-style-type: none"> • La volonté des citoyens à adopter de nouveaux comportements.
	Équité (+)	<ul style="list-style-type: none"> • La capacité des organisations responsables à faire respecter les règlements. • L'impact du mode de financement sur la distribution des coûts.

Note : les critères devant être maximisés (+) sont différenciés des critères devant être minimisés (-)

Le nombre d'enjeux traités par les critères ainsi que leur pertinence sont scrutés plus en détail à la section 7.5 à l'aide des teintes de durabilité.

7.2.4 Génération des options

Les solutions générées lors de séances de créativité sont énumérées à l'annexe N. Un tri a été réalisé pour éliminer les solutions affichant des limitations majeures et ainsi cibler quelques options pour la conception préliminaire. Les interventions considérées touchent autant le réseau de collecte que la station d'épuration et sont suffisamment différentes les unes des autres. Leur choix a aussi été influencé par la disponibilité des données nécessaires à leur dimensionnement et à leur évaluation. Deux options sont considérées pour l'amélioration du réseau, soit la construction d'un bassin de rétention au poste de pompage Dion et le débranchement des drains de fondation du réseau sanitaire. Ces interventions sont complémentaires à celles retenues pour la station, soit l'aménagement d'un étang aéré additionnel, la construction d'un bioréacteur et l'isolation des étangs aérés existants. Chacune de ces technologies est brièvement présentée dans cette section alors que leur dimensionnement et leur évaluation est effectué à la section 7.3.

Réseau de collecte

Les deux interventions envisagées sur le réseau de collecte visent à prévenir les débordements aux ouvrages de surverse de manière à respecter les exigences imposées par le gouvernement. La première option consiste en la construction d'un bassin de rétention (figure 7.2a) au poste de pompage Dion, celui-ci étant le plus sollicité lors des fortes pluies et de la période de fonte des neiges. Sur la base des données historiques, les débordements observés à ce poste de pompage pourraient ainsi être éliminés. Le poste de pompage Dion dessert les sous-bassins A, B, C, D, E, F, G, GA et GA2, ce qui représente 46% de la population équivalente raccordée au SMAEU.

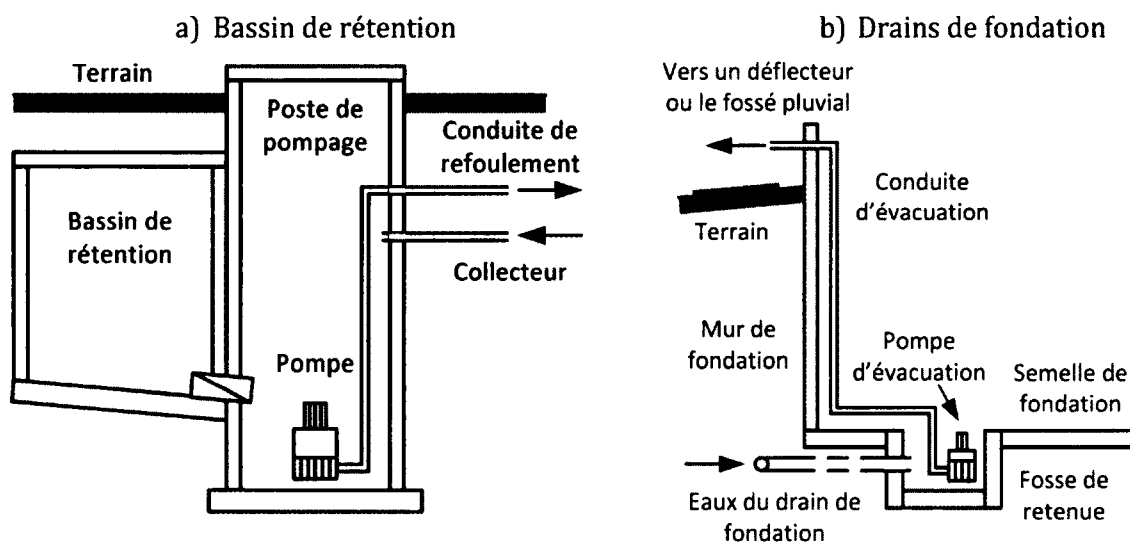


Figure 7.2 Options pour la modernisation du réseau de collecte

Le bassin de rétention au poste de pompage Dion permettrait aussi d'éviter les débordements au poste de pompage Perras situé en aval, car les débits de pointe y étant acheminés seraient réduits. La régularisation du débit est effectuée en reliant le trop-plein du poste de pompage au bassin de rétention. En période de pointe, le débit excédant la capacité des pompes est dirigé vers le bassin de rétention et non vers l'ouvrage de surverse. Lorsque le débit au poste de pompage diminue à un niveau acceptable, le niveau des eaux usées dans le poste de pompage peut baisser et les eaux usées dans le bassin de rétention peuvent alors être refoulées vers la station d'épuration. La configuration du bassin de rétention est illustrée à la figure 7.2a.

La seconde option implique de débrancher les drains de fondation qui sont actuellement raccordés à l'égout sanitaire, conformément à la réglementation municipale. Les eaux pluviales captées par les drains de fondation et dirigées vers la fosse de retenue seraient pompées vers le terrain ou vers le fossé pluvial (figure 7.2b). Les résidences n'ayant pas accès à l'égout pluvial, soit 78% d'entre elles, sont susceptibles d'avoir des branchements illicites. Cette valeur correspond au nombre résidences situées dans des secteurs desservis par les fossés pluviaux, auquel a été retiré 150 chalets et maisons mobiles. Le débranchement des drains de fondation permettrait de réduire le débit de pointe observé lors de fortes précipitations et de la fonte des neiges au niveau prévu lors de la conception du réseau de collecte. L'évaluation précise du nombre de branchements illicites nécessiterait l'inspection systématique des bâtiments par la Ville de Sherbrooke. Il n'était toutefois pas envisageable de mener une telle initiative dans le présent projet de recherche, car le débranchement des drains de fondation n'est pas envisagé à court terme. Faute de valeur exacte, le nombre de résidences dont les drains de fondation sont branchés à l'égout sanitaire est estimé lors de la conception préliminaire.

Station d'épuration

Les trois technologies proposées pour la station, soit l'étang additionnel, le bioréacteur et l'isolation des étangs, augmentent la capacité de traitement de manière à respecter les exigences de rejet. La première option consiste à aménager un étang aéré facultatif similaire à ceux exploités actuellement. Vu les particularités du terrain, l'étang additionnel serait situé à la suite du premier étang actuel (figure 7.3). Le dénivelé entre les deux étangs existants, soit 5m, permet cette configuration. L'emplacement choisi permet d'éviter les modifications au regard à l'affluent (avant l'étang 1) et au regard à l'effluent (après l'étang 2). La déphosphatation peut aussi avoir

lieu au même endroit qu'actuellement, soit avant l'étang 2 existant. Le dimensionnement du nouvel étang aéré facultatif est réalisé selon le guide du MDDEP [2010a].

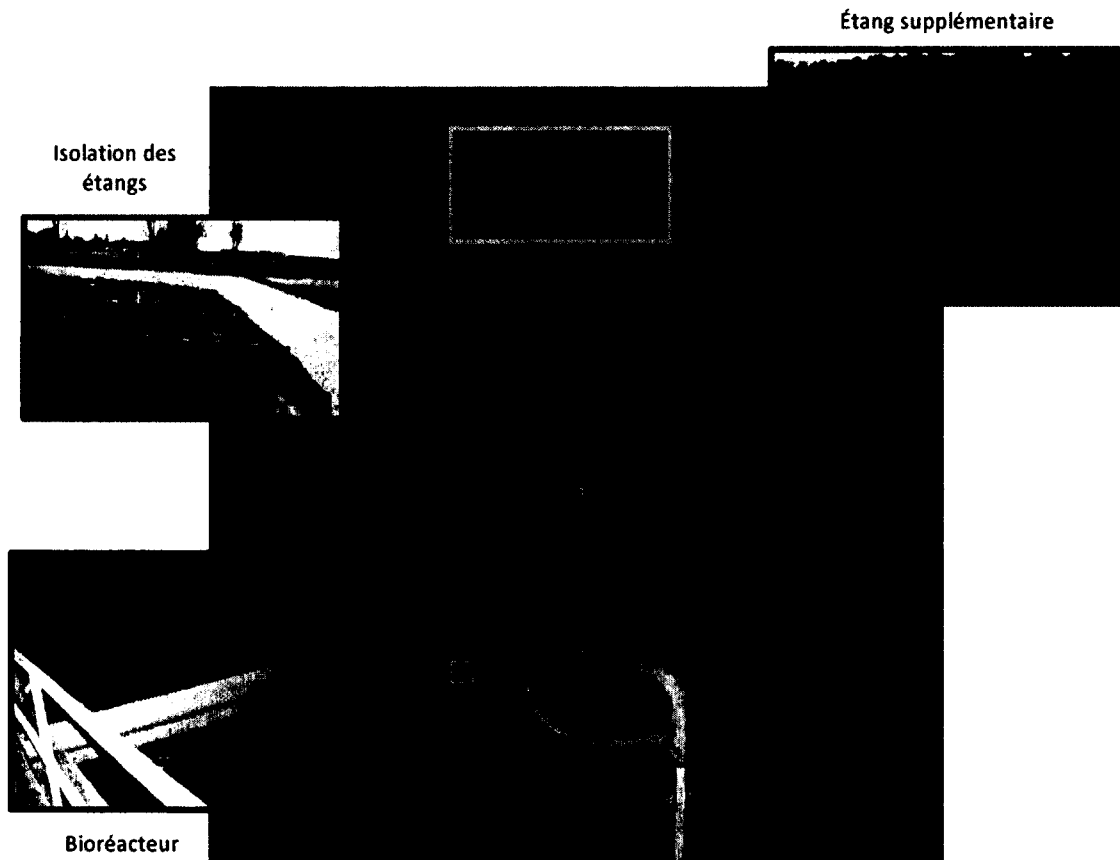


Figure 7.3 Options pour la station d'épuration

La seconde option envisagée est la construction d'un bioréacteur à support fluidisé en complément aux étangs aérés existants. Cette technologie est compacte, car elle mobilise une biomasse fixée pour la dégradation de la matière organique. La biomasse croît sur un média en plastique maintenu en suspension dans un réacteur complètement mélangé. De plus, elle est simple car elle ne nécessite pas d'équipement de recirculation des boues. Le bioréacteur à support fluidisé serait situé en amont de l'étang 1 existant, juste après le regard à l'affluent (figure 7.3). Le dimensionnement du bioréacteur est réalisé selon les spécifications transmises par la compagnie Mabarex [2010], fournisseur de la technologie SMBR.

La troisième option vise à accroître le rendement des étangs aérés existants en hiver, car il s'agit de la période de l'année pour laquelle les exigences de rejet sont le plus difficile à respecter. Elle ne requiert pas l'ajout d'une unité de traitement, mais plutôt de panneaux isolants flottants à la

surface des étangs aérés pour conserver la chaleur présente à l’affluent. Tel qu’illustré à la figure 7.3, les modules posés sur les étangs sont constitués de panneaux isolants insérés dans une enveloppe. Les modules sont liés entre eux et un espace est laissé entre les enveloppes pour que l’air et l’eau puissent y circuler. Les deux étangs existants seraient recouverts en entier, excepté la deuxième cellule du deuxième étang. Le dimensionnement est réalisé selon les spécifications de la compagnie Layfield [2010], fournisseur de la technologie *REVOC insulated covers*.

Les combinaisons des options pour le réseau et pour la station sont représentées au tableau 7.11. Parmi les six combinaisons possibles, seules deux ne sont pas retenues. La combinaison du bioréacteur et du débranchement des drains de fondation est peu intéressante, car la réduction de débit à l’affluent ne permet pas de réduire significativement le volume du bioréacteur. L’isolation n’est pour sa part pas envisageable sans intervention sur les drains de fondation, car le temps de rétention doit être maximisé pour respecter les exigences de rejet.

Tableau 7.11 Combinaisons retenues pour le réseau de collecte et la station d’épuration

	Étang aéré (Sta-A)	Bioréacteur (Sta-B)	Isolation (Sta-C)
Bassin de rétention (Res-A)	Res-A – Sta-A	Res-A – Sta-B	n.a.
Drains de fondation (Res-B)	Res-B – Sta-A	n.a.	Res-B – Sta-C

Peu importe l’option retenue, un dégrilleur est installé à l’affluent de la station d’épuration dans le but de limiter la présence de corps étrangers dans les boues et faciliter leur valorisation. Cette intervention s’avère nécessaire, car la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles prévoit interdire l’enfouissement des matières organiques, incluant les boues d’épuration, d’ici 2020 [MDDEP, 2011d]. De plus, l’installation d’un surpresseur additionnel est requise à la station, peu importe la technologie retenue, pour traiter la charge supplémentaire à l’affluent.

7.2.5 Choix des indicateurs et les outils de développement durable

Les indicateurs et les outils de développement durable servant à l’évaluation des options selon les critères choisis ont été énumérés au tableau 5.4. Leur pondération et fonction d’utilité linéaire sont données à la section suivante. Les outils retenus (AECV, ACCV, consultation des experts et consultation des parties prenantes) possèdent leur méthodologie propre (sections 5.2.2 et 5.2.3).

7.2.6 Choix d’une approche d’aide à la décision

Les raisons motivant le choix de la méthode SMART ainsi que les étapes de cette méthode sont décrites à la section 5.2.3. La principale particularité de la méthode SMART consiste en

l'utilisation d'une fonction d'utilité linéaire permettant d'exprimer l'évaluation pour chaque indicateur sur une échelle commune. Ceci permet ensuite d'agréger plusieurs indicateurs faisant partie d'un thème ou d'une dimension en un seul indice.

7.3 Conception préliminaire

La conception préliminaire, troisième étape du PICDI, regroupe l'élaboration des concepts, leur évaluation puis la recommandation d'un d'entre eux.

7.3.1 Élaboration des concepts

Le dimensionnement et la configuration des options considérées pour le réseau de collecte et la station d'épuration sont présentés dans cette section.

Réseau A – Bassin de rétention

Un mandat a été octroyé en 2000 par la municipalité de Deauville pour la conception d'un bassin de rétention au poste de pompage Dion. Suite à la fusion de Deauville avec Sherbrooke en 2002, le projet a été suspendu, car le territoire desservi par le SMAEU ne faisait plus partie des zones de développement prioritaires. La configuration retenue pour le bassin dans le présent projet est similaire à celle ayant été fixée en 2000. Les données sur les débordements projetés en 2000 sont accompagnées des valeurs plus récentes observées entre 2005 et 2010 au tableau 7.12.

Tableau 7.12 Données pour le dimensionnement du bassin de rétention

	Projections (2000)	Mesures (2005-2010)
Débit excédentaire (m ³ /h)	56,4	80,6
Durée maximale des débordements (h)	5	3,5
Volume du bassin (m ³)	282	282

Le débit excédentaire entre 2005 et 2010 est supérieur à celui projeté en 2000, car il correspond à celui de la pompe mobile amenée par camion au poste de pompage lors des débordements. La pompe mobile est utilisée pour rejeter les eaux usées dans un fossé près du poste Dion de manière à éviter les débordements au poste Perras situé en aval, car ceux-ci sont accompagnés de refoulements dans les sous-sols. Le débit excédentaire mesuré entre 2005 et 2010 a été ajusté selon de la croissance projetée de la population dans les sous-bassins en amont du poste Dion. Les événements pour lesquels les pompes du poste Dion ont dû être arrêtées pour respecter la capacité du poste Perras ne sont pas pris en compte dans les calculs. En effet, le remplacement

des pompes au poste Perras, réalisé en 2008, font que cette mesure n'est plus nécessaire. La configuration du bassin de rétention est donnée à la figure 7.4.

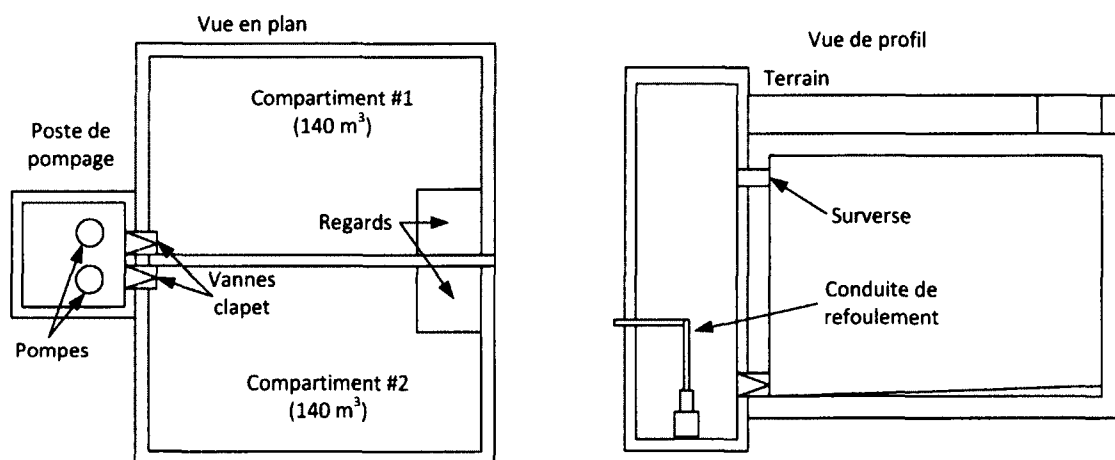


Figure 7.4 Configuration du bassin de rétention

Un bassin de rétention d'un volume d'environ 280m³ serait en mesure de contenir les débordements. La capacité des autres postes de pompage situés dans les sous-bassins touchés par le développement résidentiel a été validée selon la démarche présentée à l'annexe O.

Réseau B – Débranchement des drains de fondation

Le nombre de résidences non desservies par le réseau d'égout pluvial (excepté les maisons mobiles et les chalets) est évalué à 1446. Faute de données, la proportion des résidences avec un branchement des drains de fondation au réseau d'égout sanitaire est estimée à 50%. Ceci correspond au taux de branchements non conformes observé sur le territoire lors du programme de débranchement des gouttières. Les caractéristiques des équipements requis dans les résidences pour le débranchement des drains de fondation sont décrites au tableau 7.13.

Tableau 7.13 Équipements requis pour le débranchement des drains de fondation

Dimensions de la fosse de retenue	64 cm par 64 cm par 46 cm (volume de 0,19 m ³)
Capacité de la pompe d'évacuation	0,5 HP (0,373 kW)
Tuyauterie pour évacuer l'eau à l'extérieur	Diamètre de 38 mm et longueur de 6 m

La dimension de la fosse de retenue et la capacité de la pompe d'évacuation sont celles d'une installation typique. Il est supposé que toutes les résidences ayant des branchements illicites disposent déjà d'une fosse de retenue. Cette hypothèse est justifiée par le fait que les eaux

provenant des drains de fondation devaient y être dirigées avant la construction du réseau d'égout sanitaire en 1989. De plus, il serait anormal que les maisons construites après 1989 ne soient pas dotées de fosses de retenue. Il est également supposé que la fosse de retenue est située à une distance raisonnable (3m) d'un mur extérieur et que l'eau est rejetée 3m plus haut que le niveau dans la fosse de retenue.

L'évaluation précise du débit détourné de l'égout sanitaire grâce au débranchement des drains de fondation requière la prise de mesures dans un nombre représentatif de résidences. Comme une telle activité n'est pas envisageable dans le cadre des présents travaux de recherche, deux approches sont utilisées pour obtenir des valeurs approximatives. La première approche se base sur le niveau de captage et d'infiltration prévu lors de la conception du réseau de collecte en 1988 (76 L/p.d) et sur celui proposé pour la conception des réseaux au Québec (110 L/p.d) [Brière, 2006]. Comme de grandes portions du réseau sont récentes, de telles améliorations comparativement à la situation actuelle sont réalistes. La réduction des débits parasites estimée par cette approche varie entre 370 et 650 litres par résidence par jour (L/rés.d).

La seconde approche consiste à se baser sur les réductions de débit observées dans d'autres villes nord-américaines ayant mené des programmes de débranchement des drains de fondation. Il a été possible d'obtenir de telles données de trois villes états-uniennes: New Brighton (Minnesota), Auburn Hills (Michigan) et Ann Arbor (Michigan). Les réductions obtenues sont respectivement de 756, 1488 et 363 L/rés.d. La proportion de branchements illicites avant la mise en place des programmes dans ces villes varie grandement (entre 10% et 100%). Le nombre de branchements observé dépend, entre autres, de la réglementation en place lors de la construction des résidences desservies ainsi que de la volonté des municipalités à faire respecter cette réglementation. Vu la gamme de valeurs estimée, une réduction de 350 L/rés.d est jugée conservatrice et est retenue pour le dimensionnement préliminaire. Les références et les calculs pour les deux approches sont exposés à l'annexe O.

La capacité de pompage des postes les plus sollicités ayant été vérifiée pour l'option du bassin de rétention, elle est aussi considérée adéquate pour l'option du débranchement des drains de fondation. Ceci est justifié par le fait que les débits domestiques sont les mêmes pour les deux options et que les débits d'eaux parasites sont plus faibles pour la seconde.

Station d'épuration – Équipements communs

L'installation d'un dégrilleur est envisagée pour toutes les options à la station d'épuration. Vu le profil hydraulique existant, il est préférable d'installer celui-ci au regard où se jettent les conduites de refoulement existantes. Des pompes sont nécessaires pour amener les eaux usées jusqu'au dégrilleur, car celui-ci se situe au niveau du terrain. Un abri isolé protège du gel le dégrilleur et la benne où s'accumuleront les déchets. Les eaux usées sortant du dégrilleur sont acheminées vers le bioréacteur ou vers le premier étang aéré selon l'option retenue. Le surpresseur additionnel est pour sa part installé dans le bâtiment de service existant. Le choix du dégrilleur et du surpresseur ne sont pas abordés en détail, car ils n'affectent pas le dimensionnement des trois options considérées à la station d'épuration. Les caractéristiques du dégrilleur, des surpresseurs existants et du nouveau surpresseur sont données à l'annexe O.

Station A – Étang aéré facultatif

Le dimensionnement de l'étang aéré facultatif supplémentaire est effectué à l'aide du modèle [MDDEP, 2010a] utilisé pour l'évaluation de la station d'épuration existante (section 6.3.2). Le débranchement des drains de fondation, permet d'acheminer un débit moindre à la station d'épuration et rend possible la construction d'un étang additionnel plus petit (3894 m³) que celui requis pour le statu quo (5661 m³). La configuration de l'étang supplémentaire est détaillée à l'annexe O. La charge et la concentration en DBO₅ à l'affluent ainsi que celles à l'effluent estimées à l'aide du modèle sont données au tableau 7.14, accompagnées des exigences de rejet pour les trois périodes visées. Les exigences sont respectées pour les deux configurations du réseau.

Tableau 7.14 Performances avec l'étang aéré supplémentaire pour la DBO₅

	Réseau – A (bassin de rétention)		Réseau – B (drains de fondation)		Exigences		Actuel (2003-2008)	
	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)
Affluent	123,3	238	137,6	238	n.a.	n.a.	120,1	196
Eff. hiver	18,1	35,0	18,5	31,9	20	37	17,3	24,6
Eff. été	5,1	8,5	5,0	8,3	15	19	7,9	11,2
Eff. année	11,0	19,9	11,0	19,0	20	26	10,0	15,1

Tel qu'anticipé, les conditions hivernales sont moins favorables et dirigent le dimensionnement. Le traitement d'une charge plus importante impose des besoins additionnels en aération, y compris dans les étangs aérés existants. Le nombre d'aérateurs requis dans chaque étang est validé à l'annexe O en tenant compte de la demande carbonée en oxygène pour toutes les saisons

ainsi que de la demande azotée en oxygène en été. Un temps de rétention d'environ 2 jours dans la partie non aérée du dernier étang est recommandé pour assurer un enlèvement adéquat des MES [MDDEP 2010a]. Les temps de rétention pour les options A et B du réseau de 1,95 jours et 2,18 jours sont donc adéquats. Un temps de rétention entre 20 et 25 jours est recommandé pour assurer le respect de l'exigence pour les coliformes fécaux. Les temps de rétention pour les options A et B du réseau sont de 18,3 d et 19,5 d, légèrement en dessous du temps prescrit. Le respect des exigences est tout de même envisagé, car celles-ci sont facilement rencontrées dans les conditions actuelles avec un temps de rétention moyen est de 18,5 jours.

Le système actuel de déphosphatation devrait permettre d'atteindre la concentration à l'effluent exigée de 0,8 mg/L, dans la mesure où la quantité d'alun injectée est augmentée. Avec un taux d'enlèvement de 85% sur une base annuelle et un rapport massique Al:P d'environ 1,8, la quantité d'alun nécessaire à la déphosphatation équivaut à environ 2,6 fois celle consommée actuellement.

L'exigence prévue au projet de règlement d'Environnement Canada sur l'azote ammoniacal vise sa fraction non ionisée (NH_3) et dépend du pH. Entre 2006 et 2008, le pH le plus élevé à l'effluent a été de 7,9 et la limite de 1,25 mgN/L pour le NH_3 correspond à une valeur de 46,6 mgN/L à un pH de 8,0 pour l'azote ammoniacal total. Or, la concentration la plus élevée à l'effluent mesurée entre 2006 et 2008 a été de 31,3 mgN-NH₄/L. De plus, la concentration en NTK projetée à l'affluent est d'environ 30 mgN/L, ce qui est inférieur à l'exigence à l'effluent pour le NH_4 . Ainsi, le respect de la nouvelle exigence sur l'azote ammoniacal ne semble pas poser de problème.

Station B – Bioréacteur à lit fluidisé

Le dimensionnement du bioréacteur a été réalisé selon les données fournies par Mabarex Inc., fournisseur de la technologie SMBR. Ses spécifications et sa configuration sont présentées à l'annexe O. Le bioréacteur est situé en amont du premier étang, immédiatement après le dégrilleur. Le débit fourni par un des surpresseurs actuels suffit amplement pour l'aération. Le bioréacteur est utilisé avec un court temps de rétention et cible l'enlèvement de la DBO₅ soluble, ce qui permet un volume de bassin restreint. Un taux d'enlèvement minimal, assuré peu importe la saison, est retenu pour le dimensionnement préliminaire. Le traitement de la DBO₅ particulaire se fait dans les étangs aérés existants. La concentration en DBO₅ à l'effluent des étangs est estimée à l'aide du modèle du MDDEP [2010a]. Les résultats sont donnés au tableau 7.15.

Tableau 7.15 Performances avec le bioréacteur pour la DBO₅

	SMBR		Étangs		Exigences	
	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)
Affluent	123,3	238	74,0	142,8	n.a.	n.a.
Effluent hiver	74,0	142,8	14,8	28,5	20	37
Effluent été	74,0	142,8	5,3	8,9	15	19
Effluent année	74,0	142,8	10,1	18,1	20	26

Tel qu'anticipé, les conditions hivernales sont les moins favorables et dirigent le dimensionnement. Cette variation saisonnière est due aux étangs aérés et non au bioréacteur. Pour le dimensionnement préliminaire, une performance minimale du bioréacteur atteinte en toute saison est retenue pour évaluer la charge à l'affluent des étangs. Néanmoins, une grande variabilité n'est pas attendue car le bioréacteur mobilise une biomasse fixée, car la température hivernale à l'affluent est d'au moins 6°C et car seule la DBO₅ soluble y est traitée. La capacité des aérateurs existants à rencontrer la demande en oxygène est validée à l'annexe O. Le débit d'air requis est plus faible que pour le cas de l'ajout d'un étang aéré car le bioréacteur permet de diminuer la charge dirigée vers l'étang 1.

Les conditions affectant le rendement quant à l'enlèvement des matières en suspension et du phosphore total sont identiques à celles prévalant pour le cas de l'ajout d'un étang aéré. Le respect des exigences pour ces paramètres est donc envisagé pour les mêmes raisons. Le bioréacteur pourrait accroître l'enlèvement de l'azote ammoniacal en période de nitrification, car le rapport DBO₅/NTK sera un peu plus faible que dans les étangs existants. L'exigence sur les coliformes fécaux constitue un paramètre sensible, car le temps de rétention dans les étangs aérés est d'environ 15,7 jours, soit moins que le temps de rétention recommandé de 20 jours. Néanmoins cette exigence a été respectée au cours des dernières années même pour les mois où le débit excédait 1930 m³/d et devrait continuer à l'être avec le bioréacteur.

Station C – Isolation des étangs

Tout comme les deux autres solutions, la performance épuratoire des étangs avec une couverture isolante est validée à l'aide du modèle proposé par le MDDEP [2010a]. La température de l'eau en hiver est ajustée en tenant compte de la capacité isolante de la couverture. Les principaux phénomènes associés au transfert de chaleur dans les étangs sont représentés à la figure 7.5.

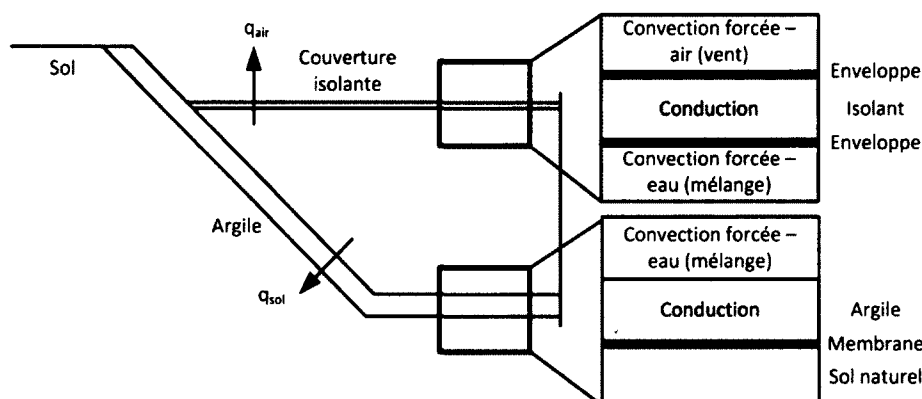


Figure 7.5 Transferts de chaleur dans les étangs aérés avec couverture isolante flottante

Les transferts de chaleur sont estimés en régime permanent pour les conditions hivernales moyennes. La température de l'eau dans les étangs est considérée uniforme, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de mélange complet utilisée pour l'évaluation du rendement épuratoire. À l'équilibre, les pertes de chaleur vers l'air et le sol égalent l'apport de chaleur par les eaux usées à l'affluent. Les équations et coefficients utilisés pour quantifier l'ampleur des transferts de chaleur sont donnés à l'annexe O. Les températures hivernales estimées à partir des flux de chaleur vers l'air et le sol ainsi que l'apport de chaleur à l'affluent sont présentées au tableau 7.16.

Tableau 7.16 Températures hivernales dans les étangs isolés

Étang et cellule	E1-C1	E1-C2	E2-C3	E2-C4
Température (°C)	5,5	5,1	4,7	1,0

La chute de température est plus prononcée dans la cellule 4 car celle-ci n'est pas couverte. La température retenue pour cette cellule est celle observée pour le SMAEU existant. Les concentrations et les charges en DBO₅ à l'effluent sont comparées aux exigences au tableau 7.17. Le respect des exigences est anticipé pour chacune des périodes.

Tableau 7.17 Performances avec l'isolation des étangs pour la DBO₅

Période	Réseau-B		Exigences	
	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)
Effluent hiver	18,6	32,2	20	37
Effluent été	7,8	13,1	15	19
Effluent année	13,8	23,9	20	26

Seules les températures hivernales ont été ajustées pour le calcul des performances, même si les panneaux sont laissés sur les étangs durant toute l'année, car les températures moyennes

observées dans les étangs aérés pendant les autres saisons sont supérieures à celle de l'affluent. Les exigences pour toutes les périodes sont respectées, bien que la marge de manœuvre sur l'exigence annuelle soit moindre que pour les deux options évaluées précédemment. La capacité des aérateurs est validée en fonction de la demande carbonée et azotée en oxygène à l'annexe O. Les aérateurs existants sont adéquats dans la mesure où le débit d'air est légèrement augmenté, conformément aux spécifications du fournisseur.

Les paramètres affectant le rendement quant à l'enlèvement des matières en suspension et du phosphore total sont identiques à ceux prévalant pour le cas de l'étang aéré additionnel et du bioréacteur. Le respect des exigences pour ces paramètres est donc envisagé pour l'isolation des étangs. En ce qui concerne l'azote ammoniacal, l'isolation des étangs est susceptible d'allonger la période de nitrification en limitant les pertes de chaleur au printemps et à l'automne. Toutefois, la couverture est aussi susceptible de nuire à la volatilisation, un phénomène contribuant à l'enlèvement de l'azote ammoniacal. Le respect de l'exigence est anticipé peu importe l'importance relative de ces deux phénomènes, car la concentration en azote Kjeldhal projetée à l'affluent est inférieure à l'exigence à l'effluent. Le temps de rétention de 17,5 jours devrait normalement permettre le respect de l'exigence sur les coliformes fécaux vu les performances observées à la station dans les années passées. Toutefois, le taux d'élimination des organismes pathogènes pourrait être réduit s'il dépend fortement de l'exposition solaire, car la couverture isolante constitue une barrière au rayonnement ultraviolet. Dans les projets réalisés jusqu'à présent par Layfield, la couverture isolante n'a pas compromis l'atteinte des exigences sur les coliformes fécaux. L'influence du rayonnement solaire sur la désinfection dans les étangs aérés devrait néanmoins être étudiée plus en profondeur dans des travaux subséquents.

7.3.2 Évaluation technique des concepts

Pour compléter la validation du respect des exigences, les options envisagées pour le réseau de collecte et la station d'épuration ont été évaluées par un groupe d'experts selon la méthode décrite à la section 5.2.2. Les évaluations ont été réalisées pour chacun des critères sur une échelle de 0 à 4. Celles-ci sont pondérées puis agrégées pour donner une note globale selon le volet technique. Les résultats obtenus pour le réseau de collecte sont présentés au tableau 7.18. Tel qu'expliqué à la section 7.2.7, deux approches sont retenues pour agréger les évaluations des experts. La première accorde la même importance au jugement de chaque expert (colonne « égale ») tandis que la seconde accorde plus d'importance à ceux affichant une faible incertitude (colonne « ajustée »).

Tableau 7.18 Performance technique des options pour le réseau selon le groupe d'experts

Importance des experts	Pondération	Res-A : Bassin de rétention		Res-B : Drains de fondation	
		Égale	Ajustée	Égale	Ajustée
Risque de bris	0,181	2,7 ± 0,3	2,7 ± 0,3	2,9 ± 0,4	3,0 ± 0,3
Conséquences des bris	0,181	2,6 ± 0,5	2,6 ± 0,5	2,3 ± 0,4	2,5 ± 0,5
Robustesse	0,329	2,1 ± 0,5	2,1 ± 0,5	2,9 ± 0,4	3,0 ± 0,5
Flexibilité	0,309	2,7 ± 0,4	2,7 ± 0,3	2,2 ± 0,4	2,4 ± 0,3
Total	1,000	2,5 ± 0,4	2,5 ± 0,4	2,6 ± 0,4	2,7 ± 0,3

Note : l'incertitude sur les valeurs correspond au niveau d'incertitude moyen mentionné par les experts.

Les deux critères relatifs à la fiabilité (le risque de bris et les conséquences des bris), lorsque additionnés, ont une pondération légèrement plus élevée que les deux autres critères (robustesse et flexibilité). Les performances agrégées pour les deux options sont considérées semblables vu l'incertitude exprimée par les experts. Le débranchement des drains de fondation a toutefois un faible avantage à cause de sa performance sur le critère de la robustesse. Il s'agit du seul critère où une différence marquée peut être observée entre les options. L'incertitude exprimée par les experts est similaire d'un critère à l'autre et d'une option à l'autre. Ce dernier se situe un peu en deçà du niveau identifié comme moyen ($\pm 0,5$). L'approche consistant à moduler l'importance relative accordée à chaque expert en fonction de l'incertitude dévoilée donne des résultats similaires à celle leur attribuant une importance égale. L'évaluation des options selon chacun des critères est discutée au tableau 7.19. Les commentaires recensés font ressortir les avantages et les désavantages des options, mais aucune des deux ne se démarque clairement.

Tableau 7.19 Commentaires sur l'évaluation technique par les experts pour le réseau

Critère	Res-A	Res-B	Commentaires
Risque de bris	2,7	3,0	Comme les pompes d'évacuation sont distribuées sur le territoire, il est impossible que toutes brisent en même temps. De plus, elles permettent d'éviter les surcharges aux postes de pompage ainsi que les risques de bris associés. Le bassin de rétention possède pour sa part peu de pièces mécaniques, mais sa faible fréquence d'utilisation peut engendrer des dysfonctionnements.
Conséquences des bris	2,6	2,5	Les bris sont susceptibles de causer des débordements ou des refoulements dans les sous-sols pour les deux solutions.
Robustesse	2,1	3,0	Les pompes d'évacuation réduisent le captage dans le réseau de collecte. Celui-ci est alors moins sensible aux événements extrêmes (précipitations et fonte) que pour l'option du bassin de rétention.
Flexibilité	2,7	2,4	Il est plus facile de modifier la capacité du bassin de rétention que les installations dans chacune des résidences. Toutefois, le débranchement des drains de fondation procure une flexibilité accrue à la station d'épuration, car le débit y étant acheminé est diminué.

Les options considérées pour la station d'épuration ont été évaluées selon les mêmes critères et les résultats sont donnés au tableau 7.20.

Tableau 7.20 Performance techniques des options pour la station par les experts

	Pond.	Sta-A : Étang aéré		Sta-B : Bioréacteur		Sta-C : Isolation	
		Égale	Ajustée	Égale	Ajustée	Égale	Ajustée
Importance des experts							
Risque de bris	0,174	3,1 ± 0,2	3,2 ± 0,2	2,3 ± 0,6	2,5 ± 0,5	2,1 ± 0,8	2,1 ± 0,7
Conséquences des bris	0,174	3,4 ± 0,2	3,5 ± 0,2	2,0 ± 0,7	2,1 ± 0,6	1,8 ± 0,8	1,8 ± 0,7
Robustesse	0,326	3,6 ± 0,3	3,6 ± 0,2	2,2 ± 0,8	2,3 ± 0,7	1,4 ± 0,9	1,4 ± 0,9
Flexibilité	0,326	2,4 ± 0,4	2,4 ± 0,3	2,2 ± 0,7	2,3 ± 0,6	1,3 ± 0,9	1,3 ± 0,9
Total	1,000	3,1 ± 0,2	3,2 ± 0,2	2,2 ± 0,7	2,3 ± 0,6	1,6 ± 0,9	1,6 ± 0,8

La pondération des critères établie pour l'évaluation des options pour la station d'épuration est très semblable à celle fixée pour le réseau de collecte. La performance de l'étang aéré est significativement supérieure à celle des deux autres options, sauf pour le critère de la flexibilité, tandis que la différence entre l'ajout d'un bioréacteur et l'isolation des étangs existants est notable. Alors que l'incertitude exprimée par les experts pour l'évaluation de l'étang aéré est faible, elle est plus élevée pour les autres options. Contrairement à la première technologie, les deux autres ne sont pas utilisées au Québec à l'heure actuelle. Tel qu'observé pour le réseau, l'ajustement des évaluations en fonction du niveau de certitude exprimé par les experts affecte peu les résultats finaux. L'évaluation des options est discutée au tableau 7.21.

Tableau 7.21 Commentaires sur l'évaluation technique pour la station par les experts

Critère	Sta-A	Sta-B	Sta-C	Commentaires
Risque de bris	3,2	2,5	2,1	Les étangs aérés sont favorisés par leur utilisation répandue et leur simplicité. Le bioréacteur mobilise des équipements un peu plus sophistiqués, tandis que les panneaux isolants sont exposés aux perturbations météorologiques et aux animaux.
Conséquences des bris	3,5	2,1	1,8	Lors de bris, le temps de rétention des étangs aérés permet d'intervenir sans affecter le traitement, ce qui n'est pas le cas pour le bioréacteur. Les panneaux isolants auraient à être remplacés lors de bris, dont la fréquence est difficile à prévoir.
Robustesse	3,6	2,3	1,4	Le long temps de rétention des étangs aérés permet d'absorber les fluctuations à l'affluent, contrairement au bioréacteur. Des températures hivernales très froides pourraient compromettre l'atteinte des exigences avec l'isolation des étangs.
Flexibilité	2,4	2,3	1,3	Les possibilités d'optimisation avec l'ajout d'un étang aéré ou d'un bioréacteur (premier étang en mélange complet, isolation des étangs, agrandissement du bioréacteur) sont plus grandes que celles pour l'option d'isolation des étangs (du premier étang en mélange complet).

L'évaluation plus favorable des experts pour l'étang aéré peut, en partie, s'expliquer par le fait que cette technologie leur soit plus familière. En effet, coupler le bioréacteur aux étangs existants devrait permettre d'atteindre un bon niveau de robustesse et d'éviter les conséquences négatives en cas de bris. Toutefois, la performance du bioréacteur est significativement plus faible pour ces deux critères. De même, les appréhensions sur la fiabilité et la robustesse des couvertures isolantes transparaissent dans le niveau d'incertitude élevé exprimé pour cette technologie.

La performance des options combinées (réseau et station) est donnée au tableau 7.22. Ces résultats sont basés sur les résultats ajustés en fonction de l'incertitude exprimée par les experts. Une importance égale est accordée à la performance de l'option pour le réseau et celle pour la station. Selon le volet technique, une légère préférence est observée pour la combinaison du débranchement des drains de fondation avec la construction d'un étang aéré supplémentaire.

Tableau 7.22 Performance techniques des combinaisons d'options (réseau et station)

	Res-A et Sta-A	Res-B et Sta-A	Res-A et Sta-B	Res-B et Sta-C
Réseau	2,5 ± 0,4	2,7 ± 0,3	2,5 ± 0,4	2,7 ± 0,3
Station	3,2 ± 0,2	3,2 ± 0,2	2,3 ± 0,6	1,6 ± 0,8
Moyenne	2,8 ± 0,3	2,9 ± 0,3	2,4 ± 0,5	2,1 ± 0,6

Comme la différence de performance entre les deux options considérées pour le réseau est faible, le classement des combinaisons est principalement affecté par les résultats obtenus pour la station. La combinaison du bassin de rétention avec le bioréacteur apparaît légèrement préférable à celle incluant l'isolation des étangs. Il est important de noter que le niveau d'incertitude est plus élevé pour ces deux dernières combinaisons. La performance globale de toutes les combinaisons se situe entre un niveau satisfaisant (2) et bon (3).

7.3.3 Évaluation de la durabilité des concepts

L'évaluation environnementale, économique et sociale est réalisée à l'aide des critères et outils énumérés à la section 5.2.2. L'approche retenue est inspirée de l'évaluation réalisée à la section 6.4 sur le système dans sa configuration existante.

Analyse environnementale du cycle de vie

L'AECV des options considérées pour la modernisation du SMAEU de Deauville se base sur la même méthodologie que l'AECV effectuée à la section 6.4.1 pour le système existant.

Objectif et champ d'étude

L'AECV est intégrée au processus de conception avec l'objectif de comparer le profil environnemental des différentes options et ainsi supporter la prise de décision. Tout comme pour le système existant, la fonction du SMAEU modernisé est d'empêcher l'exposition des citoyens aux eaux usées et de préserver les usages qui sont fait des plans d'eau. L'unité fonctionnelle est de protéger la santé humaine et de préserver les écosystèmes par la collecte et le traitement des eaux usées de 5286 personnes équivalentes sur une période de 55 ans. Le SMAEU modernisé peut ainsi desservir 560 personnes équivalentes de plus que le système dans sa configuration actuelle jusqu'à la fin de la vie utile de celui-ci prévue en 2064. Les frontières du champ d'étude sont présentées à la figure 7.6.

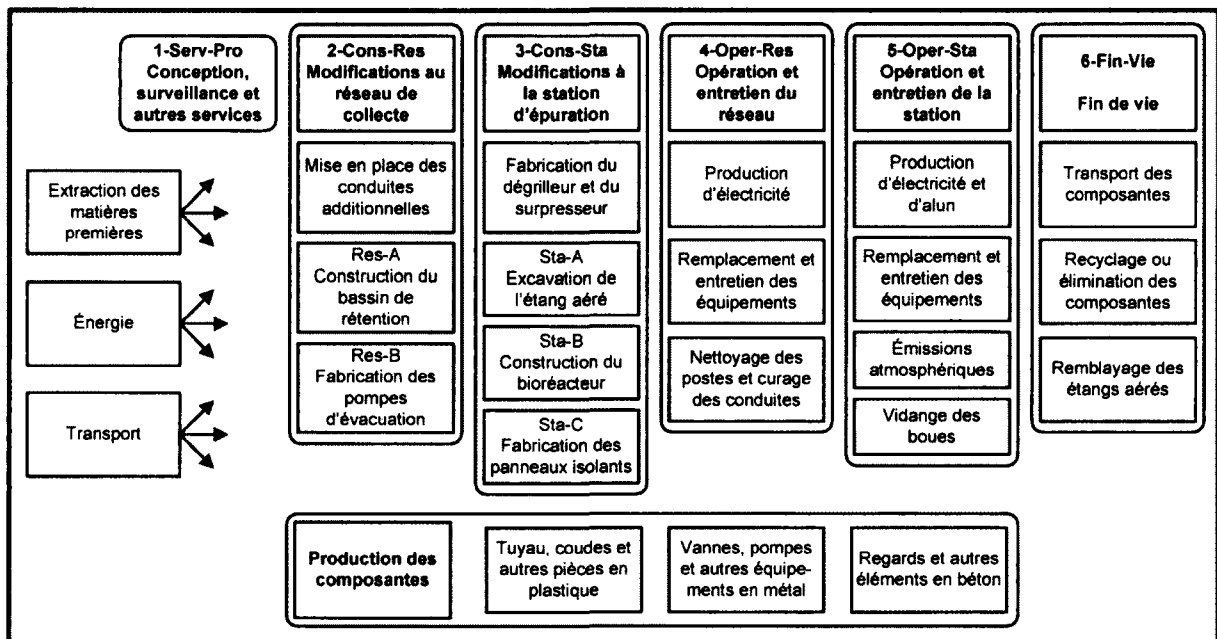


Figure 7.6 Frontières du champ d'étude pour l'AECV

Les infrastructures en place ainsi que l'opération du SMAEU pour les années avant 2009 sont exclues des frontières, car ces activités sont identiques pour toutes les options. Les autres phases du cycle de vie sont incluses, car il est possible d'améliorer leur profil par la modernisation. La phase de construction diffère pour chacune des options alors que les activités considérées pour la conception, l'opération, l'entretien et la fin de vie sont sensiblement les mêmes d'une à l'autre. Outre l'excavation, la mise en place des équipements est exclue du système à l'étude, car celle-ci est réalisée manuellement ou à l'aide de machinerie légère. Les émissions à l'effluent de la station d'épuration ne sont pas incluses dans le champ d'étude, car cet aspect est couvert par le volet

technique et car le respect des exigences pour les paramètres normés (DBO₅, P_T, C.F. et MES) assure l'équivalence fonctionnelle. Il ne serait donc pas approprié de discriminer les options en se basant sur les émissions à l'effluent. L'azote ammoniacal fait toutefois exception, car la couverture isolante entrave le phénomène de volatilisation et accroît la concentration à l'effluent comparativement aux deux autres options. Pour ce cas particulier, les émissions additionnelles à l'affluent en azote ammoniacal pour l'isolation des étangs sont prises en compte.

Analyse de l'inventaire

La majorité des sources de données énumérées au tableau 6.23 pour l'AECV du système existant ont été utilisées pour l'AECV portant sur sa modernisation. Les données ont été adaptées tel que décrit au tableau 7.23.

Tableau 7.23 Adaptation de l'analyse de l'inventaire du système existant

Sous-système	Éléments inclus	Adaptations
Services préalables	Conception, surveillance du chantier, financement, etc.	Frais incidents typiques (20% des coûts de construction).
Fabrication des composantes	Réseau de collecte. Station d'épuration.	Inventaire des pièces et équipements selon les documents des fournisseurs.
Construction du réseau	Excavation, remblai et compactage. Sable et gravier.	Selon la longueur de conduite d'égout dans les nouveaux développements.
Construction de la station	Excavation, remblai et compactage. Gravier, argile et déboisement.	Selon les dimensions de l'étang aéré supplémentaire.
Opération en entretien du réseau	Électricité Autre activités pour l'entretien	Selon les débits pour l'électricité. Selon la population équivalente pour l'entretien des conduites, des regards et des postes à basse pression. Selon le temps d'opération pour la durée de vie des pompes.
Opération et entretien de la station	Électricité et alun Vidange des boues Émissions atmosphériques	Selon la demande en oxygène pour l'électricité. Selon l'enlèvement du phosphore pour l'alun. Selon les boues accumulées pour la vidange des boues. Selon les boues digérées pour les émissions atmosphériques.
Transport	Matériaux, équipements et matières résiduelles	Selon la masse des équipements et matériaux.
Fin de vie	Dépôt de matériaux secs et site d'enfouissement	Selon les équipements et matériaux.

Outre les pompes, il est posé que la durée de vie des autres équipements mécaniques en place ne sera pas affectée par les nouvelles conditions d'exploitation ou qu'à tout le moins, les différences seront similaires d'une option à l'autre. Les sources de données complémentaires consultées pour l'inventaire des nouveaux équipements sont énumérées au tableau 7.24. L'inventaire des

équipements est modélisé de manière simplifiée et inclut les matériaux ainsi que des procédés génériques de fabrication. La principale banque de données secondaire utilisée est Ecoinvent 2.2 [Ecoinvent Centre, 2010]. Lorsque nécessaire, elle est complétée par MIET 3.0 [Suh, 2004]. Le transport est modélisé selon les distances au tableau 6.24, sauf si les fournisseurs sont connus.

Les deux mélanges énergétiques mentionnés à la section 6.4.1 (Québec et NPCC) sont comparés lors de l'analyse de sensibilité. Toutefois, comme l'AECV est utilisé comme outil d'aide à la décision, une optique conséquentielle est privilégiée et le mélange de base retenu pour les calculs est celui du NPCC. En effet, le très faible impact du mélange québécois peut amener à favoriser des systèmes énergivores. Ce mode de prise de décision n'est toutefois pas généralisable si l'on considère l'ensemble des projets réalisés au Québec, car la capacité de production québécoise est limitée et qu'il faudrait alors s'alimenter à partir du réseau régional. La fréquence de remplacement des équipements est la même que celle posée pour l'AECV du système existant, soit 20 ans pour les équipements mécaniques et 75 ans pour les infrastructures.

Tableau 7.24 Sources de données pour l'analyse de l'inventaire des nouvelles composantes

Sous-système	Éléments inclus	Inventaire de production	Émissions et extractions
Bassin de rétention	Excavation, remblai et compactage. Sable, gravier et béton armé.	Dimensionnement.	Ecoinvent 2.2
Débranchement des drains de fondation	Conduites et pompes d'évacuation (fabrication et opération).	Dimensionnement. Documentation des fournisseurs (Flotec).	Ecoinvent 2.2 Déclaration environnementale de produit (Flygt).
Travaux communs	Dégrilleur et surpresseur (fabrication et opération)	Documentation des fournisseurs (IPEC et Hibon).	Ecoinvent 2.2
Bioréacteur à support fluidisé	Excavation, remblai et compactage. Sable, gravier, béton armé et média. Conduites d'aération et aérateurs.	Documentation des fournisseurs (Mabarex).	Ecoinvent 2.2
Isolation des étangs	Fabrication des ancrages (câbles et tuyaux en acier et bases en béton). Fabrication des enveloppes (PEHD) et des panneaux isolants (PSE).	Documentation des fournisseurs (Layfield Environmental).	Ecoinvent 2.2

Les émissions atmosphériques carbonées sont calculées selon le modèle développé pour caractériser la dynamique épuratoire du système existant (figure 6.10). Les émissions atmosphériques en azote ammoniacal sont pour leur part basées sur le taux de volatilisation estimé pour le système existant. Ce dernier est considéré proportionnel au temps de rétention, comme le suggère le modèle développé par von Sperling [2007] pour les étangs facultatif. Pour

l'option avec l'isolation des étangs, seul le temps de rétention dans la cellule non couverte est pris en compte pour le calcul des émissions d'ammoniac dans l'air.

La fréquence de vidange des boues et la quantité vidangée est estimée à l'aide des facteurs déterminés pour la production et la digestion des boues dans le cas du système existant. Conformément à la politique québécoise sur la gestion des matières résiduelles [MDDEP, 2011d], leur valorisation est envisagée plutôt que l'enfouissement. L'application sylvicole est retenue comme avenue de valorisation la plus probable. La vidange des boues et leur conditionnement sont alloués au SMAEU, tandis que l'épandage des boues et les émissions au sol associées sont alloués à la production de bois. En dernier lieu, la fin de vie est modélisée selon l'approche du contenu recyclé, tel que décrit à la section 6.4.1. L'inventaire détaillé est disponible à l'annexe P.

Évaluation des impacts

L'évaluation des impacts potentiels liés à la modernisation du SMAEU est réalisée à l'aide de la méthode ReCiPe. Les impacts sont calculés pour les trois catégories de dommages (santé humaine, écosystèmes et ressources) puis normalisés. Les résultats présentés à la figure 7.7 portent sur les options retenues pour le réseau de collecte des eaux usées.

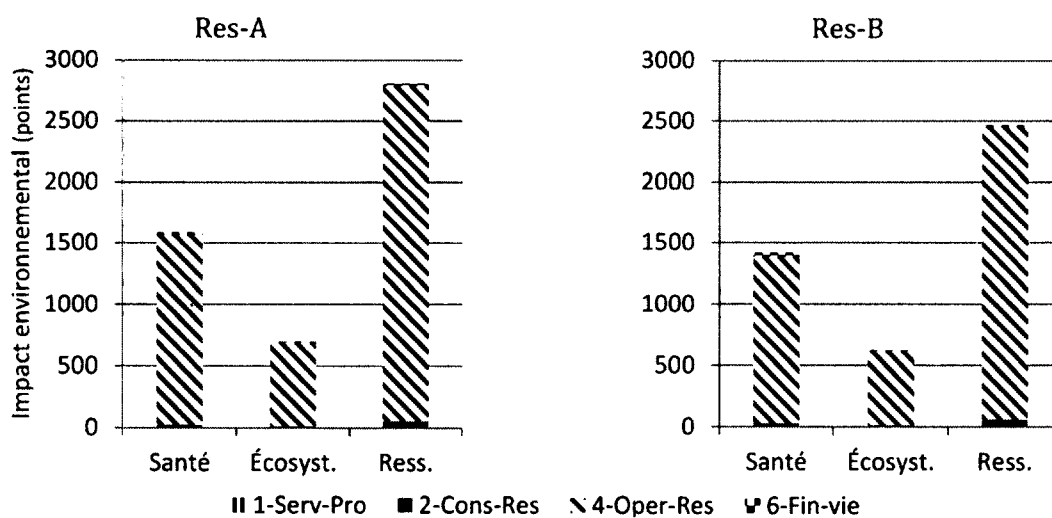


Figure 7.7 Impacts normalisés pour le réseau selon ReCiPe

Plus de 95% des impacts potentiels découlent de la phase d'opération pour les trois catégories d'impact pour les deux options. Lors de la phase de construction, l'extension du réseau de collecte a plus d'impact que la construction du bassin de rétention ou la fabrication des pompes d'évacuation. La meilleure performance du débranchement des drains de fondation s'explique

par une consommation en électricité réduite aux postes de pompage. L'impact de la construction est semblable pour les deux options, même si des matériaux et des opérations très différentes sont impliqués. Les impacts potentiels associés au cycle de vie de la station d'épuration sont donnés à la figure 7.8, pour les trois options considérées.

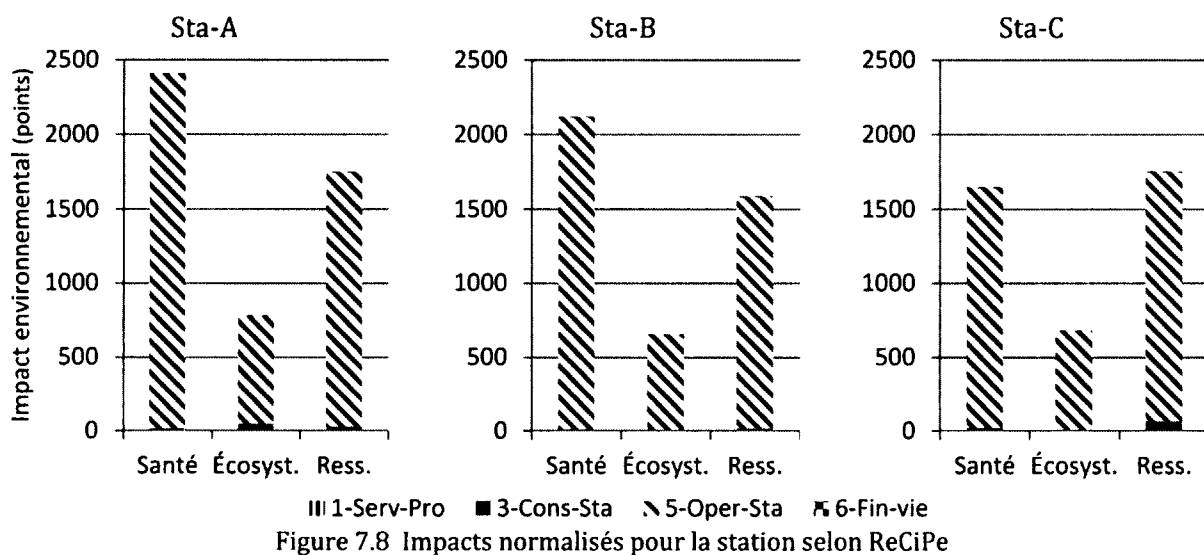


Figure 7.8 Impacts normalisés pour la station selon ReCiPe

Tout comme pour le réseau, la phase d'opération de la station domine clairement avec plus de 93% des impacts potentiels pour les trois catégories d'impact. Les écarts entre les options sont dus aux différences dans la consommation d'électricité et dans les émissions en ammoniac dans l'air. Le dispositif d'aération du bioréacteur est plus efficace que celui des étangs aérés, grâce à un volume de bassin plus restreint, ce qui explique la différence entre ces deux options. La bonne performance de l'isolation des étangs est pour sa part due à l'influence de la couverture sur la volatilisation de l'ammoniac. La baisse anticipée pour les émissions dans l'air fait de l'option Sta-C celle avec les impacts potentiels les moins élevés. Toutefois, l'augmentation des émissions dans l'eau en azote ammoniacal ne sont pas prises en compte par la méthode ReCiPe. Les conséquences du transfert des émissions de l'air vers l'eau découlant de la couverture des étangs ne peuvent être estimées par cette méthode. Par conséquent, une analyse de sensibilité est menée lors de l'interprétation avec la méthode IMPACT 2002+ [Jolliet *et al.*, 2003] qui prend en compte les émissions d'ammoniac dans l'air et dans l'eau.

Les impacts normalisés et pondérés pour les options combinées (réseau et station) sont donnés à la figure 7.9. Les impacts sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources y sont combinés en un seul indicateur selon les facteurs de pondération donnés au tableau 5.9.

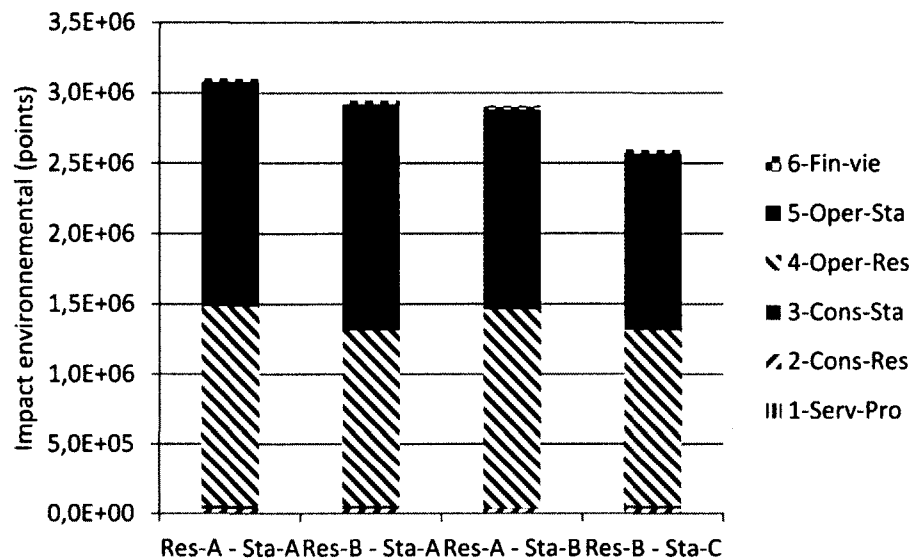


Figure 7.9 Impacts pondérés pour les options combinées selon ReCiPe

Vu les résultats obtenus pour le réseau et la station, il est normal de constater que la phase d'opération du SMAEU a un impact beaucoup plus important que les autres phases du cycle de vie. La production d'électricité est à l'origine de ces impacts pour le réseau tandis les émissions atmosphériques s'y ajoutent pour la station. La combinaison du débranchement des drains de fondation avec l'isolation des étangs apparaît la plus avantageuse, car les gains associés à la réduction des débits dans le réseau se conjuguent à ceux découlant de la baisse des émissions atmosphériques en ammoniac à la station.

Interprétation

Les processus contribuant le plus aux impacts pour toutes les combinaisons sont la production d'électricité et les émissions atmosphériques à la station. Les travaux de construction, la fabrication des équipements et la fin de vie ont pour leur part une faible importance. La part relative des processus dominants par rapport aux impacts totaux est présentée au tableau 7.25.

Tableau 7.25 Principaux processus contribuant aux impacts pour les options combinées

Santé humaine	Écosystèmes	Ressources
Électricité (réseau) : 31% à 39%	Électricité (réseau) : 38% à 43%	Électricité (réseau) : 50% à 53%
Électricité (station) : 18% à 25%	Électricité (station) : 22% à 26%	Électricité (station) : 27% à 33%
Station (NH ₃): 7% à 25%	Station (CH ₄): 18% à 19%	

À eux seuls, les processus de production d'électricité, d'épuration des eaux usées et de digestion des boues sont responsable d'au moins 75% des impacts potentiels totaux, peu importe la catégorie d'impact visée. Les impacts de chacune des combinaisons d'options selon les trois mélanges énergétiques inclus dans l'étude sont donnés à la figure 7.10.

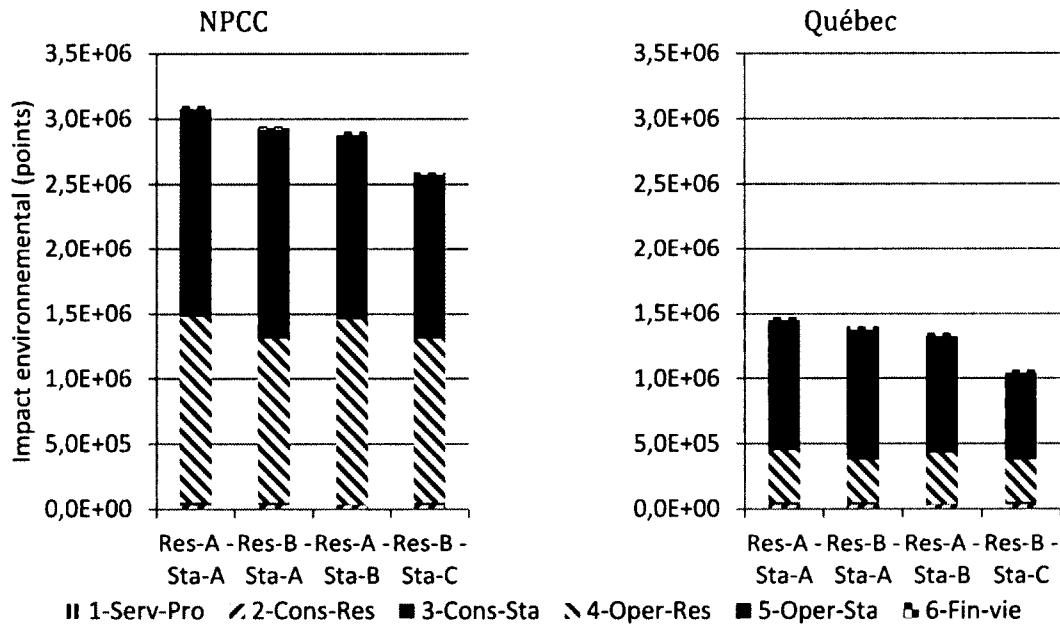


Figure 7.10 Influence du mélange énergétique sur les impacts des options selon ReCiPe

En termes absolus, les impacts sont très sensibles au choix du mélange énergétique et les impacts potentiels avec un mélange NPCC sont environ deux fois supérieurs à ceux avec le mélange québécois. Toutefois, le classement des options est le même pour les trois mélanges énergétiques. L'impact relatif de la production d'électricité est donc amené à varier, sans affecter les autres facteurs permettant de discriminer les options.

La seconde analyse de sensibilité porte sur l'influence de la méthode d'impact sur les résultats obtenus pour l'opération de la station d'épuration. Les résultats obtenus avec la méthode IMPACT 2002+, disponibles à l'annexe P, confirment que l'impact associé aux émissions d'ammoniac dans l'air est plus important que celui d'émissions égales dans l'eau. Tout comme avec ReCiPe, l'isolation des étangs amène une réduction des impacts pour la phase d'opération. Ces conclusions préliminaires doivent toutefois être interprétées avec prudence, car la volatilisation de l'ammoniac dans les étangs aérés est peu documentée dans la littérature et ce phénomène a donc dû être quantifié de manière approximative. En dernier lieu, les hypothèses

posées pour leur modélisation des phases de construction et de fin de vie n'ont pas fait l'objet d'analyses de sensibilité car celles-ci ont une influence mineure sur les impacts totaux.

La quantification des marges d'erreur selon l'analyse de Monte-Carlo ou la méthode de propagation des incertitudes n'est pas réalisée dans la présente recherche, tout comme dans l'ensemble des études recensées à la section 2.6.4. La collecte des données d'incertitude sur l'ensemble des flux élémentaires et intermédiaires a été jugée trop lourde vu les objectifs poursuivis. Selon Joliet *et al.* [2010] la marge d'incertitude typique rencontrée en AECV est de 10% pour les impacts sur les changements climatiques et la consommation des ressources, de 30% pour la formation de smog, l'acidification et l'eutrophisation tandis qu'elle atteint un facteur 10 pour la toxicité et l'écotoxicité. Selon la figure 7.9, la différence entre les options est limitée, soit environ 20% entre la pire et la meilleure. Comme les principaux processus contributeurs sont les mêmes pour toutes les options, il est tout de même possible de les différencier en écartant les paramètres communs. Les écarts entre les options sont dus à des différences pour la consommation énergétique et les émissions atmosphériques. Or, l'incertitude sur ces valeurs est beaucoup plus faible que celle sur les résultats obtenus par les modèles d'évaluation des impacts.

Teintes de durabilité

Tel qu'abordé à la section 7.2.6, les teintes conventionnelle et durable sont fixées pour exprimer les résultats du volet environnemental selon une échelle de 0 à 1. La teinte conventionnelle est calculée à partir de l'AECV réalisée à la section 6.4.1 pour le SMAEU existant. Ces impacts, calculés pour 4726 personnes, sont ajustés sur la base de la population équivalente. Sont inclus les impacts dus à la construction d'un réseau et d'une station pour 560 personnes additionnelles, l'opération et l'entretien du SMAEU pour 5286 personnes ainsi que la fin de vie du SMAEU pour 5286 personnes. Pour maintenir l'équivalence fonctionnelle, la consommation d'alun est ajustée selon la nouvelle exigence sur le phosphore. La fabrication, l'opération, l'entretien et la fin de vie du dégrilleur sont aussi ajoutées. La teinte durable est pour sa part estimée en supposant une réduction des impacts d'un facteur cinq par rapport à la teinte conventionnelle. Le positionnement des quatre combinaisons selon cette échelle est présenté au tableau 7.26.

Tableau 7.26 Classement des options selon les teintes pour le volet environnemental

Conv.	Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-A	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C	Durable
3,13 \times 10 ⁶ pt	3,10 \times 10 ⁶ pt	2,94 \times 10 ⁶ pt	2,90 \times 10 ⁶ pt	2,59 \times 10 ⁶ pt	0,63 \times 10 ⁶ pt
0	0,01	0,08	0,09	0,21	1

Les gains environnementaux par rapport à la teinte conventionnelle sont limités pour toutes les combinaisons et sont presque inexistants pour la combinaison de l'étang aéré additionnel avec le bassin de rétention. Les implications de ces résultats sur la performance d'ensemble des options sont discutées plus en détail à la section 7.5.

Analyse des coûts sur le cycle de vie

L'ACCV a été réalisée de manière complémentaire à l'AECV, selon la même méthodologie que celle employée à la section 6.4.2 pour l'évaluation du système existant.

Objectif et champ d'étude

L'objectif de l'ACCV est de comparer les coûts des options envisagées pour la modernisation du SMAEU et ainsi faciliter la prise de décision. La fonction et l'unité fonctionnelle retenues sont identiques à celles décrites pour l'AECV. Le champ d'étude diffère pour sa part quelque peu, car les coûts associés à la main d'œuvre et aux intérêts payés sur les emprunts sont inclus.

Collecte des données

De nombreuses données compilées pour l'ACCV du SMAEU existant ont pu être adaptées pour l'évaluation des options considérées pour sa modernisation. Ces ajustements sont décrits au tableau 7.27.

Tableau 7.27 Adaptation des coûts colligés pour le système existant

Sous-système	Sources de données	Adaptations
Construction du réseau	Estimations des entrepreneurs (mise en place de l'égout sanitaire).	Selon l'indice du coût de la construction.
Construction de la station	Estimations des entrepreneurs (construction des étangs aérés).	Selon les dimensions de l'étang aéré additionnel et l'indice du coût de la construction.
Opération et entretien du réseau	Budgets d'opération.	Selon les débits pour l'électricité. Selon la population pour l'entretien des conduites, des regards et des postes à basse pression. Selon le temps d'opération pour la durée de vie des pompes.
Opération et entretien de la station	Budgets d'opération.	Selon la demande en oxygène pour la consommation en électricité. Selon l'enlèvement du phosphore pour la consommation d'alun. Selon les boues accumulées pour la vidange des boues.
Fin de vie	RSMMeans [2008] (démantèlement) et Recyc-Québec [2009] (gestion des matières résiduelles).	Selon les équipements et matériaux additionnels.

Tout comme pour l'AECV, aucun ajustement n'a été apporté à la durée de vie ou l'entretien des équipements mécaniques déjà en place sur le réseau, à l'exception des pompes. De plus, les coûts associés au suivi et à l'entretien préventif des postes de pompage sont considérés identiques aux coûts actuels, car aucun poste supplémentaire n'est construit. Les coûts de suivi et d'entretien pour la station d'épuration sont aussi posés égaux à ceux engagés en ce moment, à l'exception des dépenses additionnelles associées à l'opération et l'entretien du dégrilleur. Pour les nouveaux équipements, les coûts sont basés soit sur des estimations réalisées pour des projets antérieurs ou des estimations préparées par les fournisseurs. Les sources spécifiques à chacune des options sont présentées au tableau 7.28.

Tableau 7.28 Sources de données pour les coûts des nouvelles composantes

Étape du cycle de vie	Sources de données
Bassin de rétention	Estimation réalisée en 2000 par une firme de génie-conseil pour le bassin. Coûts comparables à ceux donnés dans RSMMeans [2008].
Débranchement des drains de fondation	Coûts assumés par des municipalités nord-américaines ayant récemment implanté ce type d'initiative.
Travaux communs à la station d'épuration	Coûts assumés par la Ville de Sherbrooke (surpresseur) et fourni par le fabricant (dégrilleur).
Bioréacteur à support fluidisé	Estimation réalisée en 2010 par le fournisseur (Mabarex).
Isolation des étangs	Coûts fournis par le fournisseur (Layfield Environmental).

Les coûts pour chacune des options selon les principales phases du cycle de vie sont disponibles à l'annexe Q. Comme dans tout projet, les coûts estimés sont susceptibles de ne pas être égaux aux coûts réellement engagés. Les niveaux d'incertitude propres à chacune des approches utilisées pour l'estimation [OIQ, 2003; Meinzing, 2010] sont donnés au tableau 7.29.

Tableau 7.29 Niveaux d'incertitude pour l'estimation des coûts

Méthode d'estimation	Description	Incertitude
Estimation préliminaire	Estimation basée sur des données partielles ou des coûts globaux tirés d'autres projets.	±20%
Estimation détaillée	Estimation basée sur une description des travaux à accomplir ainsi que des coûts unitaires ou forfaitaires.	±10%
Coûts observés	Estimation basée sur les dépenses engagées pour le système et ajustées en fonction de paramètres d'exploitation.	±5%

Aux coûts de construction s'ajoutent les dépenses en intérêts sur les emprunts contractés par les municipalités ou les gouvernements. Le calcul des intérêts associés à ces emprunts se base sur les taux d'intérêts actuellement en vigueur ainsi que sur les modalités des programmes

gouvernementaux actuels. Les emprunts octroyés aux municipalités sont financés sur 20 ans selon le taux hypothécaire préférentiel sur cinq ans (taux ordinaire moins 1%) tandis que ceux engagés par le gouvernement provincial pour les programmes de subvention sont financés sur 10 ans à un taux moindre (taux ordinaire moins 2%) [MAMROT, 2009]. Les taux futurs sont estimés à partir des taux hypothécaires observés entre 2000 et 2009. Les investissements sont entièrement financés par des emprunts, à l'exception du débranchement des drains de fondation, payé comptant par les propriétaires des résidences. La seule dépense admissible à l'aide gouvernementale est la construction du bassin de rétention. Les autres travaux ne peuvent être subventionnés, car leur nécessité découle du développement résidentiel. Tous les coûts sont pris en compte, peu importe s'ils sont assumés par le gouvernement, les municipalités ou les citoyens.

Enfin, les coûts futurs sont ajustés en fonction de l'inflation, selon les mêmes taux que ceux donnés à la section 6.4.2. L'actualisation se fait aussi de la même manière que pour l'ACCV portant sur le système existant. L'ensemble des taux retenus sont énumérés au tableau 7.30.

Tableau 7.30 Taux hypothécaires, d'actualisation et d'inflation retenus pour l'ACCV

Taux hypothécaire (2009)	5,14%		Inflation (général)	2%
Taux hypothécaire (2000-2009)	6,74%		Indice des coûts à la construction	3,5%
Taux d'actualisation	4,5%		Indice du tarif pour l'électricité	2,8%

Interprétation

Les coûts associés à la phase de construction, incluant les frais incidents et les intérêts sur emprunts, sont présentés à la figure 7.11 pour les quatre combinaisons d'options. Les différences sont significatives autant pour le réseau que pour la station.

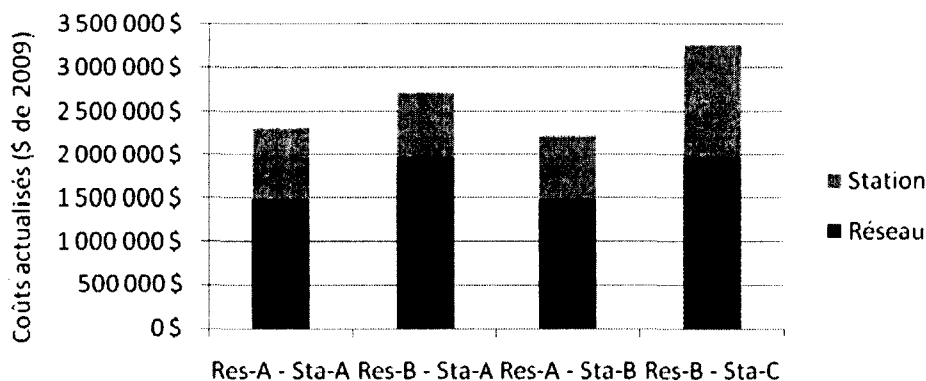


Figure 7.11 Coûts de construction des options combinées

Le débranchement des drains de fondation dans un grand nombre de résidences est plus coûteux que la construction d'un bassin de rétention. Toutefois, les coûts de l'extension du réseau de collecte (1,3M\$) sont plus importants que ceux liés aux interventions sur le réseau existant (entre 0,2M\$ et 0,7M\$). Pour l'option de l'étang aéré, le débranchement des drains de fondation rend possible la mise en place d'un plus petit étang à un coût moindre. Cependant, les économies générées ne couvrent pas le surcoût associé au réseau. Le bioréacteur a un coût d'implantation comparable à celui des étangs aérés, tandis que l'isolation des étangs s'avère beaucoup plus dispendieuse. Les résultats pour toutes les phases du cycle de vie sont présentés à la figure 7.12.

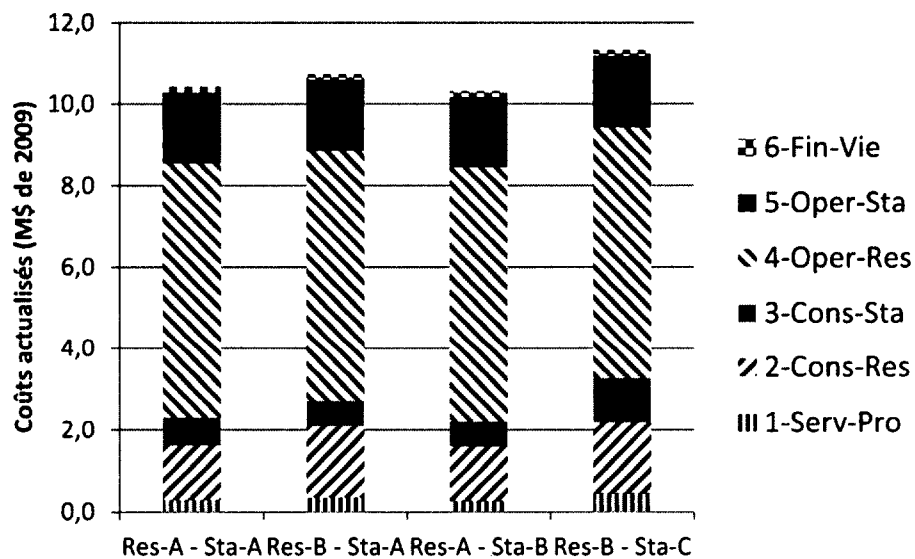


Figure 7.12 Valeur présente nette des options combinées

Les coûts d'opération du réseau dominent pour toutes les options, mais la réduction en consommation d'électricité associée au débranchement des drains de fondation ne permet pas de gains majeurs. En effet, une forte proportion des coûts d'opération et d'entretien va à la main d'œuvre en charge de l'entretien et du suivi. Les coûts liés au réseau sont plus importants que ceux requis par la station, autant pour la construction que l'opération ou la fin de vie. De plus, les coûts du débranchement des drains de fondation sont compensés par les économies d'énergie découlant d'un débit de captage plus faible.

Discussion

L'influence du taux d'actualisation sur le classement des options est investigué au tableau 7.31. La longue durée de vie considérée ainsi que l'importance des coûts d'opération expliquent en

bonne partie les écarts observés. Même si les valeurs présentes nettes varient en termes absolus selon le taux d'actualisation qui est utilisé, le classement des options demeure inchangé.

Tableau 7.31 Influence du taux d'actualisation sur le coût des options combinées

Options	Taux de 3%	Taux de 4,5%	Taux de 6%
Res-A – Sta-A	13,6M\$	10,4M\$	8,4M\$
Res-B – Sta-A	13,8M\$	10,7M\$	8,7M\$
Res-A – Sta-B	13,4M\$	10,3M\$	8,3M\$
Res-B – Sta-C	14,5M\$	11,3M\$	9,2M\$

Les incertitudes calculées à l'aide des facteurs du tableau 7.29 accompagnent les valeurs présentes nettes pour chacune des combinaisons d'options au tableau 7.32.

Tableau 7.32 Estimation de l'incertitude sur le coût des options combinées

Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-A	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C
10,4M\$ ± 0,6M\$	10,7M\$ ± 0,8M\$	10,3M\$ ± 0,6M\$	11,3M\$ ± 0,8M\$

Comme les coûts sont principalement associés à la phase d'opération et que l'incertitude pour cette phase se limite à 5%, l'incertitude sur résultats totaux est relativement faible. Néanmoins, l'écart entre les options est limité et les marges d'erreur des trois premières combinaisons se chevauchent. Une grande partie des coûts totaux sont toutefois dus à des éléments communs aux quatre combinaisons. En isolant les éléments distincts, tels le coût de construction et les dépenses en énergie, les options Res-A-Sta-A et Res-A-Sta-B apparaissent avoir ont un coût sur le cycle de vie moindre que les deux autres combinaisons.

Teintes de durabilité

Pour le volet économique, la teinte conventionnelle est calculée à partir de l'ACCV réalisée à la section 6.4.2 pour le système existant. Les coûts, calculés initialement pour une population de 4726 personnes, sont ajustés sur la base de la population équivalente. Sont incluses les dépenses nécessaires à la construction d'un SMAEU pour 560 personnes additionnelles, l'opération et l'entretien du SMAEU pour 5286 personnes ainsi que la fin de vie du SMAEU pour 5286 personnes. Pour assurer l'équivalence fonctionnelle, les dépenses en alun ont été ajustées en fonction d'un enlèvement en phosphore plus élevé et les coûts associés au dégrilleur ont été ajoutés. De plus, le coût des intérêts associés aux emprunts a été calculé selon les taux actuellement en vigueur. La teinte durable est pour sa part basée sur la valeur présente nette de

la combinaison la moins coûteuse, à laquelle sont retranchés les bénéfices potentiels découlant d'une forte valorisation de l'énergie et des nutriments contenus dans les eaux usées. Les technologies permettant un tel taux de valorisation ne sont pas ciblées dans la présente étude. Ainsi, les bénéfices au tableau 7.33 sont calculés de manière approximative, uniquement dans le but de fournir une valeur de référence pour la teinte durable.

L'estimation des bénéfices tirés de la valorisation énergétique est basée sur le contenu en énergie des eaux usées et de l'efficacité de conversion typique pour les centrales thermiques [Hydro-Québec, 2003]. Les revenus obtenus par sa vente sont obtenus à partir du tarif domestique exigé par Hydro-Québec [2009b]. De manière similaire, les bénéfices découlant de la valorisation des nutriments sont estimés à partir de leur concentration dans les eaux usées ainsi que sur le taux de récupération des systèmes permettant la séparation de l'urine [Benetto *et al.*, 2009] ou sur l'efficacité des procédés employés pour le traitement tertiaire [MDDEP, 2010b]. Les revenus de la vente des fertilisants sont calculés selon leur valeur sur le marché [Dockhorn, 2009]. L'ensemble des valeurs utilisées pour l'estimation des bénéfices sont données au tableau 7.33.

Tableau 7.33 Estimation des bénéfices issus de la valorisation des eaux usées

	Énergie	Azote	Phosphore	Potassium
Potentiel	3,2kJ/gMT [Shizas, 2004]	8,9g/p.d (section 7.1.5)	1,4g/p.d (section 7.1.5)	4g/p.d [Malmqvist, 2005]
Taux de valorisation	50%	80%	80%	80%
Quantité par an	284 200 kWh	13 750kg	2160kg	6180kg
Valeur par kWh ou kg	0,0751\$/kWh	1,59\$/kg	4,77\$/kg	0,95\$/kg
Revenu annuel	21 340\$	21 860\$	10 310\$	5890\$

Les bénéfices sont directement soustraits des coûts associés au système existant, car de récentes études démontrent que les systèmes permettant la récupération de l'énergie et des nutriments ont des coûts de mise en place et d'opération similaires à ceux des systèmes conventionnels lorsqu'aucune infrastructure n'est en place au préalable [Gray et Booker, 2003; Meininger, 2010; Oldenberg, 2007]. Le coût sur le cycle de vie pour la teinte durable donnée au tableau 7.34 indique que les bénéfices potentiels ne couvrent qu'une portion modeste des coûts. L'estimation des bénéfices est évidemment sensible au niveau de valorisation qu'il est possible d'atteindre pour l'énergie et les ressources ainsi que leur valeur sur les marchés. Au tableau 7.34, les coûts sont convertis sur une échelle de 0 (teinte conventionnelle) à 1 (teinte durable). Toutes les combinaisons permettent des gains acceptables par rapport à la teinte conventionnelle, sauf celle

utilisant l'isolation des étangs. Le fait de réutiliser les infrastructures d'interception actuelles, soit les conduites de refoulement et les postes de pompage, amène des économies intéressantes.

Tableau 7.34 Classement des options selon les teintes pour le volet économique

Conv.	Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-A	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C	Durable
11,5M\$	10,4M\$	10,7M\$	10,3M\$	11,5M\$	8,9M\$
0	0,41	0,29	0,45	0,06	1

Le dernier critère pour le volet économique, soit la volonté de payer, est calculé à l'aide des résultats présentés à la section 6.4.3 sur la valeur accordée aux biens et services environnementaux préservés par le SMAEU. Le coût des interventions permettant d'améliorer le fonctionnement du réseau et de la station est comparé avec la volonté de payer (VDP) pour résoudre les problèmes du SMAEU existant. En ce qui concerne le réseau, ceci correspond à la construction du bassin de rétention ou à l'installation, l'opération et l'entretien des pompes d'évacuation dans les résidences. Pour la station, les éléments inclus sont l'installation, l'opération et l'entretien du surpresseur et du dégrilleur, ainsi que la consommation d'alun supplémentaire requise pour le respect de l'exigence sur le phosphore. Le coût des autres travaux menés pour l'extension du réseau et l'agrandissement de station, en plus des coûts associés à l'opération et l'entretien du système pour 560 personnes sont pour leur part comparés au consentement à accepter (CAA) pour l'interruption des services rendus par le SMAEU. Les valeurs calculées sont données au tableau 7.35. Les coûts, exprimés sur une base annuelle, respectent facilement la volonté de payer médiane, autant pour l'amélioration du SMAEU que son agrandissement et ce pour les quatre combinaisons d'options.

Tableau 7.35 Comparaison de la volonté de payer avec les coûts de la modernisation

Amélioration du SMAEU (\$/an)		Agrandissement du SMAEU (\$/an)	
Coûts	VDP	Coûts	CAA
15 800\$ à 26 000\$	98 800\$ (min.)	51 800\$ à 60 100\$	945 000\$

Consultation des parties prenantes et des experts

Parmi les cinq critères inclus dans le volet social, deux ont été évalués par les experts (nuisances et développement des connaissances) tandis que les trois autres ont été évalués par les parties prenantes (comportement responsables, acceptabilité et équité). Tel que spécifié à la section 5.2.3, les parties prenantes étaient amenées à évaluer ces critères seulement si elles jugeaient

que la performance du système pouvait être affectée par le choix de l'une ou l'autre des solutions envisagées. Une forte majorité de parties prenantes a affirmé que la performance du système selon les trois critères sera affectée par le choix effectué pour le réseau tandis que pour la station, seul le critère de l'acceptabilité a été identifié comme susceptible de varier selon l'option retenue. L'ajustement des évaluations en fonction de l'incertitude exprimée par les répondants ainsi que l'agrégation des résultats sont effectués de la même façon que pour le volet technique (tableau 7.36).

Tableau 7.36 Évaluation des critères sociaux pour le réseau

Importance des répondants	Pondération	Res-A : Bassin de rétention		Res-B : Drains de fondation	
		Égale	Ajustée	Égale	Ajustée
Nuisances	0,224	2,7 ± 0,4	2,7 ± 0,3	2,2 ± 0,4	2,4 ± 0,3
Compétences	0,135	2,6 ± 0,5	2,6 ± 0,5	1,8 ± 0,5	1,8 ± 0,4
Comportements	0,227	1,8 ± 0,3	1,8 ± 0,2	3,3 ± 0,4	3,3 ± 0,4
Acceptabilité	0,219	3,0 ± 0,2	3,0 ± 0,2	1,5 ± 0,3	1,5 ± 0,2
Équité	0,195	2,1 ± 0,4	2,2 ± 0,3	3,3 ± 0,3	3,4 ± 0,2
Total	1,000	2,4 ± 0,4	2,4 ± 0,3	2,4 ± 0,4	2,5 ± 0,3

Les trois critères les plus importants (comportements responsables, nuisances et acceptabilité) ont une pondération semblable tandis que celle pour le développement des compétences est nettement inférieure aux autres critères. Le niveau d'incertitude révélé par les répondants est similaire pour chacune des options selon chacun des critères. De plus, l'évaluation ajustée selon l'incertitude exprimée par les répondants est pratiquement égale à celle accordant la même importance à chacun d'entre eux. Bien que des différences significatives entre les deux options soient observées pour tous les critères, leur performance agrégée est similaire. Les commentaires permettant d'interpréter les résultats sont donnés au tableau 7.37.

Tableau 7.37 Commentaires sur l'évaluation des critères sociaux pour le réseau

Critère	Res-A	Res-B	Commentaires
Nuisances	2,7	2,2	Les pompes d'évacuation sont bruyantes et peuvent occasionner des débordements d'eau claire dans les sous-sols lors de bris. Des nuisances (débordements et refoulements) peuvent aussi survenir si la capacité du bassin de rétention est excédée.
Compétences	2,6	1,8	La conception du bassin de rétention demande des compétences techniques, tandis le programme de débranchement requiert principalement de faire respecter la réglementation existante.
Comportements	1,8	3,3	Le débranchement des drains de fondation élimine à la source le problème du captage et encourage les comportements favorables au bon fonctionnement du système. Le bassin de rétention permet pour sa part de limiter les effets négatifs de comportements illicites.

Tableau 7.37 Commentaires sur l'évaluation des critères sociaux pour le réseau (suite)

Critère	Res-A	Res-B	Commentaires
Acceptabilité	3,0	1,5	La construction du bassin de rétention affecte peu les citoyens, tandis que le programme de débranchement des drains de fondation requiert des travaux dans les résidences.
Équité	2,2	3,4	Il est plus équitable d'exiger aux citoyens un effort équivalent pour réduire les eaux de captage, plutôt que de construire un bassin de rétention financés par tous, même ceux respectant la réglementation.

Les résultats de l'évaluation des options pour la station d'épuration selon le volet social sont présentés au tableau 7.38. La pondération des critères retenus est semblable à celle observée dans le cas du réseau de collecte. De légères différences sont observées pour la performance agrégée des options. L'écart le plus marqué se situe entre le bioréacteur et les étangs aérés.

Tableau 7.38 Évaluation des critères sociaux pour la station

	Pond.	Sta-A : Étang aéré		Sta-B : Bioréacteur		Sta-C : Isolation	
		Égale	Ajustée	Égale	Ajustée	Égale	Ajustée
Imp. des rép.							
Nuisances	0,374	2,8 ± 0,3	2,8 ± 0,3	2,6 ± 0,6	2,7 ± 0,5	2,8 ± 0,7	2,9 ± 0,6
Compétences	0,246	1,9 ± 0,4	2,0 ± 0,3	3,4 ± 0,5	3,5 ± 0,5	2,2 ± 0,7	2,3 ± 0,6
Acceptabilité	0,379	2,2 ± 0,2	2,2 ± 0,2	2,8 ± 0,6	2,8 ± 0,6	2,8 ± 0,3	2,8 ± 0,3
Total	1,000	2,3 ± 0,3	2,4 ± 0,2	2,9 ± 0,6	2,9 ± 0,5	2,6 ± 0,5	2,7 ± 0,5

L'incertitude exprimée par les répondants pour l'étang aéré est plus faible que pour les deux autres options. Encore une fois, les résultats sont peu affectés par l'ajustement des évaluations selon le degré d'incertitude dévoilé par les répondants. Des différences significatives entre les options sont observées pour les critères du développement des compétences et de l'acceptabilité. Les résultats obtenus pour le volet social sont expliqués au tableau 7.39.

Tableau 7.39 Commentaires sur l'évaluation des critères sociaux pour la station

Critère	Sta-A	Sta-B	Sta-C	Commentaires
Nuisances	28	27	29	Un faible degré de nuisance est anticipé pour toutes les options (bruits, odeurs, véhicules près du site, etc.)
Compétences	20	35	23	Le bioréacteur, technologie récente au Québec pour l'assainissement municipal, contribue directement au développement des compétences. Les étangs aérés sont bien connus, mais leur optimisation peut receler des défis techniques. L'isolation des étangs n'est pas utilisée au Québec, mais son dimensionnement repose principalement sur les compétences du fournisseur.
Acceptabilité	22	28	28	Contrairement à l'étang aéré, le bioréacteur et l'isolation des étangs n'exigent aucun terrain supplémentaire. Ainsi, aucun déboisement n'est nécessaire et des infrastructures ne sont pas construites près des résidences existantes.

La performance selon le volet social pour les options combinées, tenant compte de l'évaluation réalisée pour le réseau et la station, est donnée au tableau 7.40. La moyenne est calculée à partir des évaluations ajustées en fonction de l'incertitude.

Tableau 7.40 Évaluation des critères sociaux pour les options combinées

	Res-A et Sta-A	Res-B et Sta-A	Res-A et Sta-B	Res-B et Sta-C
Réseau	2,4 ± 0,3	2,5 ± 0,4	2,4 ± 0,3	2,5 ± 0,4
Station	2,4 ± 0,2	2,4 ± 0,2	2,9 ± 0,5	2,7 ± 0,5
Moyenne	2,4 ± 0,3	2,4 ± 0,3	2,7 ± 0,4	2,6 ± 0,4

L'écart entre les options considérées pour la station est plus grand que celui entre les options retenues pour le réseau. Le classement des combinaisons est donc affecté par l'évaluation réalisée pour la station. Les combinaisons misant sur le bioréacteur ou l'isolation des étangs se démarquent légèrement de celles mettant en œuvre un étang aéré supplémentaire. Toutefois, l'ensemble des combinaisons se situent dans une fourchette de valeurs serrée (entre 2,4 et 2,7), vu le niveau d'incertitude exprimé (de ±0,3 à ±0,4).

7.3.4 Recommandation d'un concept

Sur la base des évaluations réalisées aux sections 7.3.2 et 7.3.3, il est possible de recommander une option parmi celles retenues pour la conception préliminaire. Différentes approches à la prise de décision multicritère sont abordées dans cette section. Certaines d'entre elles sont appliquées à la section 7.5.6 portant sur les teintes de durabilité pour le processus décisionnel. Le profil normalisé de chacune des combinaisons d'option est donné au tableau 7.41, selon le volet technique et les trois volets du développement durable. Les évaluations sont ramenées sur une échelle commune grâce aux fonctions d'utilité linéaire données à la section 7.2.6. Les valeurs de 0 et 1 correspondent respectivement à la teinte conventionnelle et durable.

Tableau 7.41 Profil normalisé des options combinées selon les quatre volets

	Res-A et Sta-A	Res-B et Sta-A	Res-A et Sta-B	Res-B et Sta-C
Technique	0,70	0,74	0,59	0,54
Environnement	0,01	0,08	0,09	0,22
Économie	0,41	0,29	0,45	0,06
Société	0,60	0,61	0,67	0,65

Aucune combinaison ne possède une performance supérieure aux trois autres selon les quatre volets ou n'affiche des résultats se rapprochant de la teinte durable selon les quatre volets. Les

évaluations les plus faibles sont observées pour le volet environnemental et le volet économique. Parmi les avenues permettant de départager des options lorsqu'aucune d'entre elles ne se démarque de façon claire, le calcul d'un indice agrégé a été discuté à la section 7.2.6. Cette approche nécessite de fixer une pondération pour chacun des volets de façon à pouvoir calculer une performance globale. Dans la mesure où la performance technique de toutes les combinaisons est considérée acceptable, cette valeur agrégée peut se limiter aux trois volets du développement durable. Le calcul d'un indice agrégé sert à illustrer la prise de décision selon les teintes de durabilité C et D à la section 7.5.7. Une autre technique, consistant à fixer des valeurs seuils minimales devant être respectées pour chacun des volets, est retenue pour la teinte B.

Le processus décisionnel propre aux projets d'ingénierie ne se borne pas aux particularités des diverses méthodes d'aide à la décision disponibles, telles la fixation de seuils ou de pondérations. Ainsi, l'ingénieur en charge d'un projet peut considérer divers scénarios quant aux préférences des décideurs pour recommander une option, mais le choix final revient au client. De plus, le secteur public, auquel est habituellement confié l'assainissement des eaux usées, se distingue du secteur privé à de nombreux égards. Une importante différence consiste au fait que les investissements d'importance doivent être approuvés par des représentants élus. Plusieurs procédures de vote, applicables dans un contexte de démocratie directe ou représentative, ont été proposées dans la littérature. Contrairement aux méthodes d'aide à la décision multicritère, ces procédures requièrent que le choix des décideurs soit dévoilé sans que leurs raisons ne soient explicitement exposées. Celles-ci incluent le vote par pointage (une quantité déterminée de points est distribuée entre les options), le vote majoritaire (l'option recueillant le plus de votes est retenue), la méthode Borda (les options sont classées par chaque participant et les rangs se voient attribués une valeur) et la méthode Condorcet (les options sont comparées par paires et l'option remportant l'ensemble des duels est retenue) [Levin et Nalebuff, 1995].

Les représentants élus inscrivent de plus en plus leurs actions dans une perspective de développement durable, vu l'adoption de stratégies à cet effet à tous les paliers gouvernementaux. Par conséquent, ils devraient normalement être en mesure de présenter comment l'évaluation de projets, programmes et politiques tient compte des volets du développement durable, puis expliquer les compromis nécessaires lors de la prise de décision. En reconnaissant les limites associées aux options disponibles par rapport à une situation durable, ils contribuent également à une utilisation appropriée du concept de développement durable.

7.4 Conception détaillée

La plupart des tâches associées à la conception détaillée ne sont pas réalisées dans le cadre de la recherche, car ceci n'apporterait pas une contribution notable à l'originalité des travaux. Cette phase du processus de conception permet essentiellement d'approfondir l'évaluation du concept recommandé et d'optimiser celui-ci. La préparation de la documentation nécessaire à l'implantation et l'opération du système est également nécessaire. Les tâches prévues au PICDI sont tout de même discutées dans les paragraphes suivants. Une attention particulière est dédiée à la proposition d'indicateurs de développement durable pour le suivi du SMAEU.

Raffiner l'évaluation du concept recommandé

L'évaluation effectuée selon le volet technique et les trois volets du développement durable pourrait être approfondie de multiples façons. Tout d'abord, une modélisation plus élaborée du réseau et de la station permettrait de confirmer le dimensionnement, l'emplacement et la configuration des équipements. Ensuite, la poursuite de la cueillette de données pour l'AECV permettrait de valider les résultats obtenus et servirait à la comparaison des variantes pour le concept retenu. Les efforts seraient dirigés vers les processus incertains contribuant le plus aux impacts environnementaux, soit la volatilisation de l'ammoniac et la digestion des boues. L'acquisition d'informations complémentaires pour l'ACCV permettrait aussi de fournir un estimé des coûts plus précis et de cibler sur quels paramètres agir pour réduire ces coûts. En dernier lieu, la consultation d'une gamme plus étendue de parties prenantes, auxquelles serait présenté le concept retenu, servirait à valider les observations préliminaires de la section 7.3.3.

Optimiser le concept recommandé

D'après les résultats obtenus lors de l'évaluation détaillée, certaines variantes seraient proposées pour accroître la performance du SMAEU (technique et développement durable).

Maximiser la robustesse et la flexibilité

Les variantes les plus prometteuses identifiées au cours du processus d'optimisation seraient évaluées selon quelques scénarios. Les améliorations envisagées devraient maximiser la performance du système dans le scénario de base tout en s'avérant robustes et flexibles.

Communiquer les recommandations

De nombreux documents doivent être élaborés pour supporter la mise en place, l'opération et la fin de vie du système (plans, devis, manuels, etc.) Dans un contexte de conception durable, ces

documents devraient non seulement inclure les indications permettant d'assurer la performance technique, mais aussi la contribution positive selon les trois volets du développement durable.

Générer les indicateurs pour le suivi

Les évaluations réalisées lors de la conception préliminaire et de la conception détaillée sont inévitablement empreintes d'incertitude. Les indicateurs pour le suivi permettent de valider la performance anticipée grâce aux données accumulées lors de l'opération. Ils servent aussi à détecter les situations problématiques et à identifier les interventions pouvant être mises en place. Les indicateurs proposés pour le SMAEU de Deauville, disponibles à l'annexe R, sont inspirés de ceux utilisés pour l'évaluation du système dans sa configuration existante. De plus, ils ciblent les points chauds identifiés à la conception préliminaire. Pour faciliter leur calcul, les indicateurs reposent si possible sur des informations amassées par l'organisation responsable.

Le volet environnemental, par l'intermédiaire de l'AECV, couvre les opérations courantes ainsi que les interventions périodiques. La majorité des données primaires sont déjà compilées pour le suivi budgétaire ou gouvernemental et peuvent être couplées avec une banque de données secondaires pour l'évaluation des impacts. Leur caractérisation plus précise nécessiterait toutefois de mieux quantifier les émissions atmosphériques à la station d'épuration. Pour le volet économique, l'ensemble des coûts est compilé par l'ACCV puis exprimé en une valeur annuelle. Les coûts pris en compte incluent les opérations courantes, les activités périodiques ainsi que des provisions pour la fin de vie du système. Les données sur les opérations courantes sont déjà nécessaires pour le suivi budgétaire, tandis que les dépenses futures peuvent être basées des estimations ou sur les coûts engagés dans le cas de systèmes similaires. L'évaluation du volet social requiert pour sa part de rassembler les données existantes sur les plaintes, les accidents de travail et les bris. Elle requiert aussi d'inciter les citoyens à communiquer leurs commentaires.

7.5 Dimensions de la conception durable

Les six dimensions de la conception durable ont été définies à la section 4.5 et l'évaluation des teintes de durabilité selon ces dimensions est illustrée par les exemples donnés au tableau 4.9. Les dimensions sont maintenant utilisées pour discuter de la mise en œuvre du PICDI pour la modernisation du SMAEU de Deauville. Ceci permet de fournir des détails supplémentaires sur l'évaluation des teintes pour chacune des six dimensions de la conception durable.

7.5.1 Processus de conception

La première dimension de la conception durable porte sur le processus de conception dans son ensemble, c'est-à-dire la réalisation des tâches proposées dans le PICDI. L'évaluation des teintes est basée sur le nombre de tâches réalisées et celles-ci sont documentées aux sections 7.1 à 7.4. Au total, 16 tâches ont été effectuées, ce qui correspond à la teinte C (tableau 7.42). La teinte la plus élevée n'a pas été atteinte, car seule une tâche de la conception détaillée a été effectuée.

Tableau 7.42 Teintes pour le processus de conception

Teinte	A	B	C	D
Nombre de tâches	Tâches clés (12)	13 à 15 tâches	16 à 18 tâches	19 à 22 tâches

Certaines tâches exigent plus de temps ou de ressources que d'autres et le nombre de tâches réalisées n'est pas directement proportionnel à l'effort investi. Comme les tâches prévues au PICDI sont interreliées, négliger des activités paraissant moins importantes telle l'identification des enjeux, peut avoir des répercussions significatives, par exemple lors de l'évaluation des concepts. Dans cette optique, ainsi que par souci de simplicité, le nombre de tâches réalisé sert à l'évaluation de cette dimension de la conception durable.

7.5.2 Choix des enjeux

La seconde dimension porte sur le choix des enjeux de développement durable couverts au cours de la conception. Pour cette dimension, l'évaluation est basée sur le nombre d'enjeux traités ainsi que leur répartition selon les volets du développement durable. Les principaux enjeux associés à l'assainissement des eaux usées ont été présentés à la section 7.1.5, tandis que ceux couverts par les critères et les indicateurs lors de l'évaluation des options ont été énumérés au tableau 7.10. Les enjeux traités se comptent au nombre de 15, soit quatre pour le volet environnemental, cinq pour le volet économique et six pour le volet social. Comme ceux-ci couvrent l'ensemble des volets du développement durable, la teinte D est atteinte pour cette dimension (tableau 7.43).

Tableau 7.43 Teintes pour le choix des enjeux

Teinte	A	B	C	D
Nombre et nature des enjeux	6 enjeux ou plus (surtout un volet)	6-8 enjeux (tous les volets)	9-12 enjeux (tous les volets)	13 enjeux ou plus (tous les volets)

Évidemment, tous les enjeux mentionnés à l'annexe M n'ont pu être traités par les critères durant le processus d'évaluation. Tel que mentionné à la section 7.2.3, leur choix repose principalement

sur la revue de la littérature, l'évaluation du système existant ainsi que la compatibilité des enjeux avec les outils d'analyse envisagés pour l'évaluation.

7.5.3 Choix des indicateurs

La troisième dimension est liée à la pertinence des indicateurs choisis pour évaluer les options selon les enjeux identifiés. Comme indiqué au tableau 7.44, plus la relation entre les indicateurs et les enjeux est forte, plus la teinte est élevée.

Tableau 7.44 Teintes pour le choix des indicateurs

Teinte	A	B	C	D
Pertinence des indicateurs	Relation partielle avec un groupe d'enjeux	Relation partielle avec un enjeu ou relation forte avec un groupe d'enjeux	Forte relation avec un enjeu	Couverture entière d'un enjeu

L'évaluation de la teinte de durabilité pour chacun des indicateurs est donnée au tableau 7.45, accompagnée de commentaires justificatifs.

Tableau 7.45 Commentaires sur les teintes pour le choix des indicateurs

Indicateur	Enjeux	Teinte	Commentaires
Utilisation des ressources non renouvelables	• L'utilisation efficace des ressources renouvelables et non-renouvelables.	C	Les ressources non-renouvelables sont considérées, mais non les ressources renouvelables.
Impact potentiel sur la biodiversité	• La destruction d'habitats due aux infrastructures. • L'impact sur les écosystèmes dû aux émissions sur le cycle de vie.	B	L'impact sur les écosystèmes est traité de manière générale sans tenir compte de toutes les particularités locales.
Impact potentiel sur la santé humaine	• L'impact sur la santé dû aux émissions sur le cycle de vie.	C	Les effets locaux, régionaux et globaux sont pris en compte, mais non ceux liés à la santé au travail causés par une exposition directe.
Coûts de conception et de construction	• La minimisation des coûts sur le cycle de vie.	C	Les coûts assumés par l'ensemble des acteurs sont pris en compte, à l'exception des coûts externes.
Coûts d'opération et d'entretien	• La maximisation des bénéfices résultant de l'opération du SMAEU. • La minimisation des coûts sur le cycle de vie.	B	Les coûts assumés par l'ensemble des acteurs sont pris en compte, à l'exception des coûts externes. Le système ne génère aucun bénéfice interne et les bénéfices externes ne sont pas quantifiés.
Coûts en fin de vie	• La minimisation des coûts sur le cycle de vie.	C	Les coûts assumés par l'ensemble des acteurs sont pris en compte, à l'exception des coûts externes.

Tableau 7.45 Commentaires sur les teintes pour le choix des indicateurs (suite)

Indicateur	Enjeux	Teinte	Commentaires
Rapport entre les frais exigés et la volonté de payer	<ul style="list-style-type: none"> • La volonté de payer des citoyens. 	C	Les coûts par citoyen, et non les frais directement exigés, sont mis en relation avec la volonté de payer exprimée.
Développement des compétences des employés	<ul style="list-style-type: none"> • Le développement des compétences des employés. 	C	La contribution est évaluée de manière générale sans traiter de manière distincte la gamme des compétences pour chacun des acteurs impliqués.
Niveau d'atteinte au bien-être ou à la santé	<ul style="list-style-type: none"> • Les nuisances engendrées par le SMAEU. 	C	Le niveau évalué est dans son ensemble, mais l'importance de chaque nuisance pour les parties prenantes n'est pas investiguée.
Potentiel d'influence sur les comportements	<ul style="list-style-type: none"> • Les comportements des citoyens 	C	Le potentiel est évalué globalement, mais les comportements problématiques ne sont pas abordés sur une base distincte.
Volonté d'adopter les solutions	<ul style="list-style-type: none"> • La volonté des citoyens à adopter de nouveaux comportements. 	C	L'acceptabilité est évaluée dans son ensemble, sans être modulée selon l'importance accordée aux facteurs contribuant à celle-ci.
Traitement tenant compte des particularités des individus	<ul style="list-style-type: none"> • La capacité des organisations responsables à faire respecter les règlements. • L'impact du mode de financement sur la distribution des coûts. 	B	Le traitement équitable des citoyens est évalué de manière globale, sans que les liens entre la perception des répondants et les préférences exprimées sur les interprétations proposées pour le concept d'équité ne soient approfondis.

La plupart des indicateurs sont en forte relation avec un seul enjeu (teinte C) et quelques-uns sont en forte relation un groupe d'enjeux (teinte B). Aucun des indicateurs n'atteint la teinte D, car certains aspects dont la quantification est plus ardue ne sont pas évalués (volet environnemental et économique) ou car certains phénomènes complexes reposant sur plusieurs facteurs sont investigués avec un seul indicateur (volet social).

7.5.4 Choix des outils

La quatrième dimension traite de la précision des outils d'analyse utilisés pour l'évaluation des indicateurs. Le barème général est donné au tableau 7.46. Chaque volet du développement durable et chaque indicateur possède ses particularités. Une gradation d'outils allant des teintes les plus faibles aux teintes les plus fortes est proposée à l'annexe S pour chacun des indicateurs.

Tableau 7.46 Teintes générales pour le choix des outils

Teinte	A	B	C	D
Précision des outils	Minimale	Modérée	Élevée	Meilleure pratique

La teinte fixée pour les indicateurs selon cette gradation est donnée au tableau 7.47, accompagnée de commentaires explicatifs.

Tableau 7.47 Teintes pour les indicateurs et les outils

Indicateur	Outil	Teinte	Commentaires
Utilisation des ressources non renouvelables	AECV	C	L'AECV est basée sur des données génériques (banque de données Ecoinvent), mais inclut des données primaires et des données reposant sur les tableaux économiques d'entrées et de sorties.
Impact potentiel sur la biodiversité	AECV	C	
Impact potentiel sur la santé humaine	AECV	C	
Coûts de conception et de construction	ACCV	C	Les coûts de conception et de construction reposent sur des estimations détaillées et les coûts d'opération et d'entretien actuels ont été ajustés pour le système futur. Les coûts en fin de vie ont pour leur part été quantifiés de manière approximative.
Coûts d'opération et d'entretien	ACCV	D	
Coûts en fin de vie	ACCV	B	
Rapport entre les frais exigés et la volonté de payer	ACCV et sondage	C	Une gamme de valeurs pour la volonté de payer a été estimée en consultant un échantillon représentatif de citoyens.
Développement des compétences des employés	Consultation des experts	B	Des experts variés ont été consulté par questionnaire, mais les évaluations n'ont pas été approfondies lors d'entretiens ou de rétroactions.
Atteinte au bien-être ou à la santé des individus	Consultation des experts	B	
Influence sur les comportements des citoyens	Consultation des parties prenantes	A	Des parties prenantes variées ont été consultées par questionnaire, mais les évaluations n'ont pas été approfondies lors d'entretiens ou de rétroactions. Les conclusions auraient aussi pu être validées par un groupe de discussion ou par la consultation de citoyens.
Volonté d'adopter ou d'appuyer les solutions	Consultation des parties prenantes	A	
Traitement des individus selon leurs particularités	Consultation des parties prenantes	A	

Les outils retenus pour l'évaluation selon le volet environnemental et le volet économique permettent dans l'ensemble d'atteindre une teinte de durabilité élevée. Une teinte plus faible, soit entre minimale et modérée est observée pour le volet social. Ce classement découle en grande partie du contexte dans lequel a été mené le projet de recherche. En premier lieu, les experts ont accepté de participer à l'étude de manière bénévole et ont signalé que leur emploi du temps ne permettait pas la tenue d'entretiens ou d'une rétroaction. Même avec l'envoi d'un questionnaire en format électronique pouvant être rempli selon la convenance des participants, de nombreux rappels ont dû être effectués pour s'assurer d'un taux de réponse acceptable. La mise en place d'un processus de consultation plus imposant auprès des parties prenantes et des

citoyens aurait nécessité une implication accrue de la Ville de Sherbrooke. Il aurait ainsi été possible de s'arrimer aux mécanismes déjà en place, d'assurer la légitimité de la démarche et de susciter l'intérêt des participants. Toutefois, comme la réalisation du projet ainsi que la forme que celui-ci prendra est encore incertaine, une telle consultation n'était pas envisageable.

7.5.5 Performance des options

La cinquième dimension sert à mettre en évidence le potentiel d'amélioration des options par rapport à une situation durable. Les teintes sont fixées de manière cohérente avec la méthode SMART, selon les adaptations décrites à la section 7.2.6. Pour faciliter la différenciation des options, des teintes intermédiaires ont été établies à la figure 7.13, en relation avec l'échelle commune allant de 0 à 1.

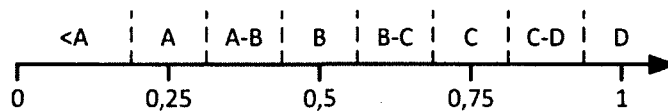


Figure 7.13 Lien entre les teintes de durabilité et la méthode SMART

Les performances des options combinées (réseau et station) ont été présentées à la section 7.3.4 pour les trois volets du développement durable. Celles-ci sont exprimées d'après les teintes au tableau 7.48. L'utilisation de la méthode SMART implique que de faibles performances sur certains critères peuvent être compensées par d'autres critères à l'intérieur d'un volet.

Tableau 7.48 Teintes pour la performance des options

Options	Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-B	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C
Environnement	<A	<A	<A	A
Économie	A-B	A	B	<A
Société	B-C	B-C	B-C	B-C

Les teintes sont semblables pour les quatre combinaisons et aucune n'atteint une teinte acceptable (B) pour tous les volets. Les raisons expliquant cette situation ont déjà été discutées en détail à la section 7.3.3. Celles-ci sont pour la plupart liées à l'impossibilité de modifier drastiquement le système existant.

7.5.6 Prise de décision

La sixième et dernière dimension de la conception durable est associée à la manière dont les critères sont considérés lors de la prise de décision. Contrairement aux autres dimensions, la

teinte ne peut être évaluée directement, car le projet n'a fait l'objet d'une décision par les autorités responsables. Des exemples permettent d'illustrer comment la prise de décision peut être réalisée selon chaque teinte. La description des teintes est rappelée au tableau 7.49.

Tableau 7.49 Teintes pour la prise de décision

Teinte	A	B	C	D
Critères considérés dans la prise de décision	Coûts directs prédominants avec critères relatifs non discriminants	Coûts directs prédominants avec critères seuils discriminants	Poids à une ou deux dimensions du D.D. avec critères seuils	Poids similaire aux dimensions du D.D. avec critères seuils

Teinte A

Selon la première teinte, l'option retenue est celle affichant les plus faibles coûts actualisés sur 20 ans, tel que prévu dans la conception conventionnelle. Toutefois, des mesures sont proposées pour améliorer les points faibles du concept choisi selon les volets environnementaux et sociaux. Les coûts sont estimés par l'ACCV exactement comme à la section 7.3.3, mais seules les 20 premières années du cycle de vie sont incluses. Les résultats sont donnés au tableau 7.50.

Tableau 7.50 Coûts actualisés sur une période de 20 ans pour les options combinées

Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-B	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C
7,0M\$	7,3M\$	6,9M\$	7,9M\$

Les options combinant le bassin de rétention avec l'étang aéré supplémentaire ou le bioréacteur pourraient être retenues, car leurs coûts actualisés sur 20 ans sont pratiquement identiques. Pour ces deux combinaisons, le remplacement graduel des pompes existantes aux postes de pompage par des modèles plus efficaces et l'utilisation de sondes à oxygène à la station pour optimiser l'aération permettrait d'améliorer à la fois la performance du système selon le volet environnemental et le volet économique. Ce genre d'interventions, axées sur l'amélioration continue des infrastructures peut par le fait même contribuer au développement des compétences des employés en charge de l'exploitation. La performance selon le volet social pourrait être améliorée par une campagne d'information sur les conséquences du branchement des drains de fondation au réseau sanitaire visant leur débranchement sur une base volontaire.

Teinte B

Selon la seconde teinte, l'option retenue est celle affichant les plus faibles coûts actualisés sur 75 ans tout en respectant des seuils minimaux selon chacun des volets. Les seuils choisis pour sont

la teinte A pour le volet environnemental, la volonté de payer pour le volet économique et la teinte B pour le volet social. Toutes les options respectent les seuils pour les volets économique et social, mais seule l'option combinant le débranchement des drains de fondation avec l'isolation des étangs atteint la teinte minimale selon le volet environnemental (tableau 7.47). Elle serait donc retenue, même en affichant les coûts sur le cycle de vie les plus élevés.

Teinte C

Le troisième teinte repose sur le calcul d'un indice unique avec une pondération accrue pour le volet économique. Une pondération de 60% est retenue pour ce volet tandis que les volets environnemental et social se voient attribués une pondération 20%. Le respect du seuil sur la volonté de payer est requis et rencontré par toutes les options. Les résultats sont donnés au tableau 7.51. Selon cette pondération, l'option combinant le bassin de rétention et le bioréacteur est préférable. En effet, ses coûts sont semblables à la combinaison du bassin de rétention et de l'étang aéré additionnel, alors que sa performance selon les deux autres volets est supérieure.

Tableau 7.51 Résultats agrégés selon une pondération accrue pour le volet économique

Options	Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-B	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C
Environnement	0,01	0,08	0,09	0,22
Économie	0,41	0,29	0,45	0,06
Société	0,60	0,61	0,67	0,65
Total	0,37	0,31	0,42	0,21

Teinte D

La quatrième teinte implique aussi le calcul d'un indice unique, mais avec une pondération égale pour les trois volets du développement durable. Comme pour les teintes précédentes, le respect de la volonté de payer est exigé. Les évaluations d'ensemble sont présentées au tableau 7.52.

Tableau 7.52 Résultats agrégés selon une pondération égale pour tous les volets

Options	Res-A – Sta-A	Res-B – Sta-B	Res-A – Sta-B	Res-B – Sta-C
Environnement	0,01	0,08	0,09	0,22
Économie	0,41	0,29	0,45	0,06
Société	0,60	0,61	0,67	0,65
Total	0,34	0,33	0,40	0,31

Tout comme pour la teinte C, l'option combinant le bassin de rétention et le bioréacteur est préférable aux autres. L'écart existant entre les trois autres options est toutefois plus faible, car

l'avantage économique de la première combinaison a un effet réduit sur la performance globale vu la pondération égale pour tous les volets.

7.6 Retour sur la mise en œuvre du PICDI pour le SMAEU de Deauville

Dans cette section sont synthétisées les remarques et conclusions résultant de la mise en œuvre du PICDI pour le projet de modernisation du SMAEU de Deauville. L'applicabilité du PICDI à d'autres projets, au regard des tâches complémentaires de la conception durable, est également discutée. Tout d'abord, il faut rappeler que le PICDI a été appliqué à une problématique concrète pour lequel un mandat de conception devait être attribué lorsque les travaux de recherche ont été amorcés. La modernisation du SMAEU de Deauville a toutefois été repoussée, car le territoire desservi n'est plus défini comme une zone de développement prioritaire par la Ville de Sherbrooke. Le processus de conception conventionnel, qui aurait été placé sous la responsabilité d'une firme de génie-conseil, n'a donc pu être comparé au processus de conception durable présenté aux sections 7.1 à 7.4.

Le volet technique a donc dû être intégré en entier aux travaux de recherche. Cette charge de travail considérable, normalement confiée à une équipe de conception, a dû être assumée en parallèle avec l'évaluation selon les trois volets du développement durable. Dans ces circonstances, l'accent a été mis sur les éléments originaux liés à la conception durable. Les tâches conventionnelles ont néanmoins été réalisées adéquatement. De plus, comme le projet de modernisation n'est pas officiellement enclenché, il n'a pas été possible de tabler sur les ressources à la disposition de la Ville de Sherbrooke pour rejoindre et consulter les parties prenantes. En dernier lieu, le statut du projet compliquait parfois les relations avec les tierces parties. En effet, il était parfois plus ardu d'obtenir des informations auprès de partenaires, car la réalisation du projet était incertaine et la conception était menée pour des travaux de recherche.

Planification et définition du problème

Il a été plusieurs fois souligné que l'analyse du SMAEU de Deauville dans sa configuration existante avait facilité l'application du PICDI au projet de modernisation. L'apport a été significatif au niveau technique, car une bonne connaissance du SMAEU a été acquise et que l'estimation des données de base s'est fait plus aisément. L'identification des points forts et des lacunes du SMAEU selon les trois volets du développement durable a aussi guidé le choix des enjeux. Ainsi, les premières tâches du PICDI ont pu être réalisées plus rapidement car le

problème, le contexte et les contraintes étaient déjà bien cernés. Il apparaît donc que les mécanismes de suivi, habituellement mis en place pour la reddition de compte, peuvent aussi être mobilisés à des fins de conception. De plus, l'identification des enjeux associés au développement durable, dans lesquels se transpose la représentation du développement durable construite par une équipe de conception, a une grande importance. En effet, elle influence ce qui sera pris en compte ou ignoré dans les étapes subséquentes lors de l'évaluation des options. Des facteurs relatifs à l'applicabilité du PICDI pour d'autres projets d'ingénierie en ce qui concerne les tâches de la première étape du processus de conception sont abordées au tableau 7.53.

Tableau 7.53 Applicabilité du PICDI – Planification et définition du problème

Conception conventionnelle	Conception durable	Applicabilité du PICDI
<ul style="list-style-type: none"> • Former l'équipe de conception • Définir le problème, les objectifs et le contexte • Identifier les contraintes et les données préliminaires • Planifier les étapes subséquentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Former une équipe multidisciplinaire • Définir les principes du développement durable et un cadre conceptuel • Identifier les enjeux associés au problème • Identifier les relations entre le projet et les composantes du cadre conceptuel • Analyser les parties prenantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Il est ardu d'évaluer des critères de développement durable si les compétences nécessaires ne sont pas disponibles ou intégrées à l'équipe. • La définition des principes, du cadre conceptuel et l'identification des enjeux sera plus cohérente d'un projet à un autre si la démarche d'une organisation est encadrée par une stratégie. • Les parties prenantes ne pourront être analysées si les efforts et les ressources nécessaires ne sont pas prévus dès l'amorce du projet.

Étude conceptuelle

Décrire une situation entièrement durable ou idéale dans laquelle les fonctions du SMAEU sont remplies dans le respect des principes du développement durable a facilité la définition des teintes de durabilité sur la performance des options. Toutefois, le choix des critères et des indicateurs de développement durable a été compliqué par les multiples considérations devant être prises en compte. D'une part, l'adoption de critères inspirée de la revue de littérature est représentative des meilleures pratiques et facilite la comparaison des résultats obtenus avec ceux tirés d'autres études. D'autre part, les critères et les indicateurs devaient être cohérents avec les enjeux identifiés ainsi que les objectifs de la recherche. Si le contexte avait permis l'implication des parties prenantes lors de l'identification des critères, des considérations supplémentaires auraient dû être prises en compte. Dans une telle situation, un ensemble de critères faisant consensus auprès des parties prenantes en plus de tenir compte des limites imposées par

les outils d'analyse, tout en étant cohérent avec le cadre théorique du développement durable et les données disponibles aurait été recherché.

La génération et le tri des options lors de l'étude conceptuelle s'est avéré un important levier décisionnel. Plusieurs solutions ont été proposées, mais il n'était pas envisageable d'en retenir un très grand nombre pour la conception préliminaire, car leur analyse aurait demandé des ressources trop importantes dans le cadre du projet actuel. Il était néanmoins essentiel de retenir une gamme variée d'options pour faciliter leur différenciation et accroître les chances d'obtenir des performances élevées selon les teintes de durabilité. Cependant, des contraintes associées au contexte de la modernisation ont dû être considérées lors de la génération des options, notamment en ce qui concerne l'utilisation des infrastructures actuelles vu leur coût d'implantation élevé et leur durée de vie. Ce facteur a réduit la possibilité de générer des options très différentes les unes des autres. Sur la base de l'étude de cas, l'applicabilité des tâches complémentaires du PICDI propres à l'étude conceptuelle est discutée au tableau 7.54.

Tableau 7.54 Applicabilité du PICDI – Étude conceptuelle

Conception conventionnelle	Conception durable	Applicabilité du PICDI
<ul style="list-style-type: none"> • Analyse fonctionnelle • Génération de concepts • Identifier les spécifications d'après les fonctions et les autres exigences 	<ul style="list-style-type: none"> • Définir les critères • Valider les critères avec le cadre conceptuel • Envisager une solution future durable • Générer un concept radicalement différent • Définir les indicateurs • Identifier les outils d'analyse • Identifier une méthode multicritère 	<ul style="list-style-type: none"> • La demande pour une solution durable doit être transmise explicitement par le client ou être implicite dans le contexte de réalisation (ex. exigence de financement). • Des compétences techniques poussées peuvent être nécessaires pour procéder au dimensionnement de solutions non conventionnelles de manière à ce que celles-ci demeurent abordables. • Compétences et expérience sont nécessaires au sein de l'équipe de conception pour permettre l'application d'outils complémentaires sans coûts élevés.

Conception préliminaire

La réalisation des tâches de la conception préliminaire a permis de constater que les solutions devaient être techniquement bien définies avant d'être évaluées selon les volets du développement durable. Il existe en effet une synergie quant à l'utilisation des outils servant à l'évaluation technique et de durabilité des options. Ainsi, des données utiles à l'AECV et l'ACCV sont directement tirées des calculs effectués pour le dimensionnement. De plus, des données nécessaires pour l'AECV, par exemple la consommation en électricité, servent aussi à l'ACCV pour

l'estimation des coûts d'opération. De nombreuses données supplémentaires ont toutefois été nécessaires, par exemple sur les émissions atmosphériques à la station, la digestion et la fréquence de vidange des boues d'épuration ou les perceptions des parties prenantes.

Par conséquent, la conception durable exige des ressources supplémentaires lorsque comparé à l'approche conventionnelle. Toutefois, l'effort qui y est consacré par une organisation ne peut être disproportionné lorsque comparé à la conception conventionnelle car celle-ci fait face à des contraintes de temps et de ressources. L'ampleur des tâches associées au PICDI peut être réduite par la réutilisation de données ou de modèles issus de projets antérieurs réalisés dans une organisation. En effet, des éléments tirés de l'évaluation du SMAEU existant ont pu être repris ou adaptés lors de l'évaluation des options considérées pour sa modernisation. Cette observation illustre bien la pertinence d'implanter graduellement le PICDI dans une organisation.

Une approche itérative, utile pour réduire le temps nécessaire à la réalisation des AECV [Jolliet *et al.*, 2010], peut aussi être appliquée à l'ensemble des outils mobilisés lors de la conception durable. En premier lieu, une évaluation simplifiée (tableau d'entrées-sorties économiques, éco-indicateurs, empreinte carbone, etc.) permet d'identifier les facteurs prépondérants, lesquels sont ensuite approfondis si nécessaire lors d'une évaluation plus détaillée. Ceci évite d'accumuler une quantité élevée de données sur des éléments qui s'avèrent avoir une influence négligeable sur les résultats. Par exemple, l'AECV comparative réalisée sur les options envisagées pour le SMAEU de Deauville a requis de nombreuses informations sur les phases de construction et de fin de vie, mais l'importance de ces phases s'est révélée négligeable. À cet égard, la réalisation de plusieurs projets permet d'acquérir une précieuse expérience et de réaliser plus rapidement la collecte des données.

La caractérisation d'un projet selon les dimensions de la conception durable s'avère sensible aux valeurs choisies pour les teintes conventionnelle et durable. Ces dimensions permettent néanmoins de présenter en toute transparence comment la démarche suivie se rattache à la conception durable tout en faisant ressortir la profondeur avec laquelle le PICDI est appliqué. La caractérisation des dimensions et leur application au projet de modernisation du SMAEU de Deauville constituent ainsi une originalité majeure de la recherche. En effet, l'évaluation des teintes pour la cinquième dimension, soit celle portant sur la performance des options, a mis en évidence l'utilité de situer celles-ci entre un niveau conventionnel et durable. À titre comparatif,

les études recensées sur la conception durable des SMAEU se limitaient essentiellement à classer celles-ci en ordre de préférence. De plus, les résultats obtenus pour cette dimension peuvent contribuer à une démarche stratégique dans une organisation ou un secteur d'activité. En effet, comme les limites des façons de faire actuelles sont identifiées par les teintes de durabilité, il devient plus aisé de tracer les grandes lignes de la stratégie permettant à long terme d'atteindre des niveaux idéaux pour chacun des volets du développement durable.

En bâtissant sur les résultats exposés dans la thèse, la mise en œuvre du PICDI dans une gamme variée de projet de conception permettrait de raffiner la procédure selon laquelle les teintes sont définies et évaluées pour chacune des dimensions. L'analyse de projets représentatifs de la conception conventionnelle permettrait pour sa part de caractériser avec plus de précision la teinte conventionnelle dans différents domaines. Lorsque l'on considère le PICDI dans son ensemble, plusieurs tâches présentées comme distinctes à la section 4.4 se sont avérées interreliées les unes aux autres. Par exemple, le choix des enjeux, des critères, des indicateurs, des outils et de l'approche d'aide à la décision ne se fait pas de manière séquentielle, mais implique plutôt des boucles de rétroaction pour s'assurer de leur compatibilité. Des commentaires supplémentaires sur l'applicabilité du PICDI en ce qui concerne l'étape de la conception préliminaire sont présentés au tableau 7.55.

Tableau 7.55 Applicabilité du PICDI – Conception préliminaire

Conception conventionnelle	Conception durable	Applicabilité du PICDI
<ul style="list-style-type: none"> • Élaborer les concepts • Évaluer les concepts à l'aide des spécifications • Recommander un concept 	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluer la performance des concepts à l'aide des critères et indicateurs, incluant une option conventionnelle servant de référence • Recommander un concept avec une méthode d'aide à la décision multicritère 	<ul style="list-style-type: none"> • Les partenaires (fournisseurs, client, parties prenantes) doivent posséder l'information requise pour l'évaluation des concepts et accepter de transmettre cette information. • La prise en compte de nombreux critères lors de la décision doit être prévue depuis le début du projet.

Pour compléter la description de la mise en œuvre du PICDI pour chacune des étapes du processus de conception dans le cadre du projet de modernisation du SMAEU de Deauville, les relations entre ces étapes sont mises en évidence à la figure 7.14.

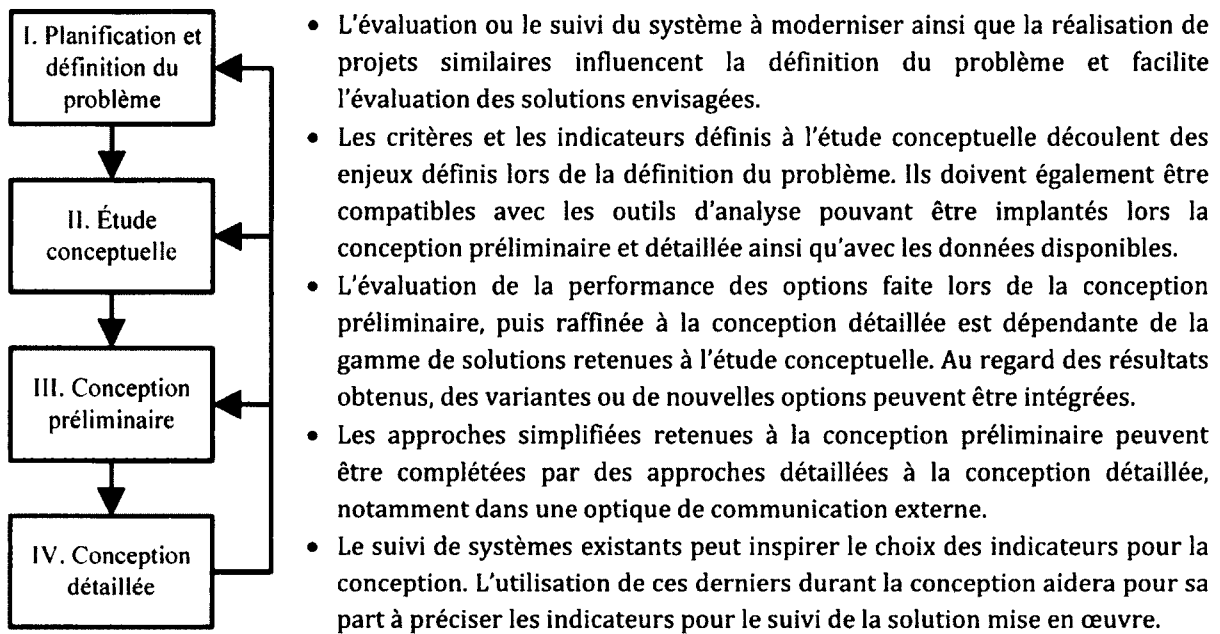


Figure 7.14 Rétroaction entre les étapes du PICDI

7.7 Freins et leviers selon les dimensions de la conception durable

Les freins et leviers à la conception durable identifiés dans cette section se rapportent à la mise en œuvre du PICDI pour la modernisation du SMAEU de Deauville décrite aux sections 7.1 à 7.4 et sont classés selon les six dimensions de la conception durable. Tel que mentionné dans la conclusion, une analyse des freins et leviers à la conception durable dans la pratique plus étendue de l'ingénierie nécessiterait la réalisation d'un certain nombre d'études de cas, ce qui constitue une piste de recherche fort intéressante. Bien qu'elle ne permette pas d'avancer des constats généraux, la réflexion critique présentée est d'une grande importance car elle soulève de nombreuses leçons et observations utiles à la future utilisation du PICDI.

Dimension 1 : Processus de conception

L'utilisation d'un processus de conception conventionnel structuré et documenté dans une organisation est susceptible de faciliter l'implantation de la conception durable, car les tâches associées au PICDI peuvent directement y être intégrées. Il est aussi raisonnable de croire que la mise en place du PICDI sera facilitée si des approches ou des outils utiles à la conception durable, tels la formation d'équipes multidisciplinaires, la participation des parties prenantes ou l'aide à la décision multicritère sont déjà employés dans une organisation. Le développement de telles compétences chez les ingénieurs, que ce soit durant le parcours universitaire ou par la formation

continue, est également primordial, tout comme leur mention dans les documents d'encadrement proposés par l'OIQ, incluant le *Guide de pratique professionnelle*.

L'application du PICDI au projet de modernisation du SMAEU de Deauville a illustré que la conception durable nécessitait des ressources complémentaires à celles requises pour la conception conventionnelle. Ainsi, les tâches du PICDI exigent du temps, du personnel possédant les compétences nécessaires, des logiciels et des banques de données, voire même des équipements ou des installations pilotes. À l'échelle de l'organisation, des incitatifs internes ou externes peuvent contribuer à l'adoption du PICDI. Il peut par exemple s'agir de l'élaboration d'une politique de développement durable ou de l'attribution de mandats permettant de développer une expertise dans ce domaine. Vu les importants efforts associés à la reconfiguration d'un processus de conception bien connu des employés, une intégration progressive du PICDI apparaît préférable. Quelques projets apparaissant plus propices à une telle démarche peuvent être ciblés pour la réalisation de tâches clés ou pour l'utilisation d'outils peu connus dans l'organisation. Ultiment, la transition de la conception conventionnelle vers la conception durable dans une organisation sera motivée par des pressions internes (par exemple, une stratégie de développement durable) ou des pressions externes (par exemple, en réponse aux demandes de clients ou aux exigences imposées par l'OIQ).

Dimension 2 : Choix des enjeux

De nombreux enjeux sont associés au développement durable et ceux-ci s'expriment différemment d'un projet à l'autre. Ainsi, les enjeux prioritaires sont susceptibles de varier en fonction du type de projet réalisé ou du contexte dans lequel il s'insère. Dans le cas de la modernisation du SMAEU de Deauville, l'identification des enjeux les plus pertinents a été facilitée par un cadre conceptuel clair ainsi que par l'abondante littérature dans le domaine de l'assainissement des eaux usées. Une organisation appliquant fréquemment le PICDI pourra aussi tabler sur l'expérience acquise au fil des projets pour cibler les enjeux clés.

Il est couramment avancé que la mise en place d'un processus participatif favorise l'expression d'opinions variées et enrichit la gamme d'enjeux pouvant être identifiés. Une telle ouverture serait aussi susceptible d'accroître la légitimité des enjeux retenus aux yeux des parties prenantes. La littérature fait toutefois état des coûts associés à la consultation des parties prenantes et des difficultés qui y sont associées [Barbier, 2005; CSA, 2002]. Il faut par exemple

inciter les gens à participer, établir un climat de confiance et dégager un consensus des discussions. Les activités choisies pour la participation des parties prenantes doivent donc être planifiées et menées avec rigueur.

Dimension 3 : Choix des indicateurs

Une grande variété de critères et d'indicateurs de développement durable pour le domaine de l'assainissement des eaux usées a été identifiée dans la littérature. Le grand nombre d'enjeux à couvrir, la gamme d'outils disponible et les différents contextes rencontrés expliquent en partie cette diversité. Bien qu'il soit difficile de spécifier une quantité idéale d'indicateurs, un nombre variant entre 10 et 15 est fréquemment mentionné. Cette valeur représenterait un compromis acceptable entre deux tensions opposées.

Alors qu'un nombre suffisant d'indicateurs est nécessaire pour couvrir les particularités des problèmes étudiés, un nombre trop élevé dilue l'influence des indicateurs clés et complique la prise de décision. De plus, le choix de chaque indicateur doit lui-même être réalisé en tenant compte des multiples qualités recherchées, notamment la force du lien avec l'enjeu ciblé, la disponibilité des données et la capacité à être évalué grâce aux outils maîtrisés. Le choix des indicateurs représente un défi pour tout projet, mais doit aussi s'accompagner de questionnements dans toute organisation appliquant fréquemment le PICDI. En effet, si des indicateurs différents sont retenus d'un projet à l'autre, la comparaison entre ceux-ci sera plus complexe, tout comme l'évaluation du progrès selon les des teintes de durabilité.

Dimension 4 : Choix des outils

Les compétences disponibles à l'intérieur d'une organisation ou par l'intermédiaire de consultants affectent inévitablement le choix des outils retenus pour l'évaluation des options. La fiabilité des outils et la crédibilité des résultats obtenus sont aussi des facteurs importants. Des compromis doivent être envisagés, en tenant compte du principe de proportionnalité, entre les outils fournissant rapidement des résultats et ceux plus complexes offrant des résultats plus détaillés. Comme les évaluations nécessitent des données fiables, des logiciels conviviaux et des compétences particulières, la qualité du support offert à une équipe de conception, que ce soit à l'interne ou à l'externe, est susceptible de faciliter l'utilisation de ces outils.

La prise en compte simultanée des trois volets du développement durable et la maîtrise d'outils variés soulèvent également la question de la multidisciplinarité à l'intérieur des équipes de conception. Des ajustements peuvent être nécessaires à cet égard, car il ne s'agit pas nécessairement d'une pratique répandue à l'intérieur d'organisations réalisant surtout des mandats techniques. En dernier lieu, une organisation sera probablement plus encline à adapter de nouveaux outils s'ils sont complémentaires à ceux déjà utilisés, par exemple pour le dimensionnement, l'estimation des coûts ou la reddition de compte.

Dimension 5 : Performance des options

L'application du PICDI au projet de modernisation du SMAEU de Deauville tend à confirmer que l'optimisation de systèmes existants offre un potentiel d'amélioration limité. En effet, les choix passés influencent habituellement les performances futures et seuls quelques paramètres peuvent être modifiés durant l'exploitation. Cette observation est d'autant plus vraie dans le cas d'infrastructures urbaines, car elles nécessitent des investissements majeurs et ont une très longue durée de vie. Dans le cas du SMAEU de Deauville, il a été nécessaire de composer avec la configuration du réseau de collecte et de la station d'épuration. De plus, la performance du SMAEU selon les critères de développement durable était affectée par de nombreux paramètres ne pouvant être influencés directement par une équipe de conception. L'évaluation du système dans sa configuration existante ainsi que celle portant sur les options envisagées pour sa modernisation ont permis d'identifier les paramètres suivants :

- Le mélange énergétique, déterminé par les producteurs régionaux, duquel découlent les impacts environnementaux associés à la consommation d'électricité.
- Les modes de financement du système, fixés par les gouvernements fédéral, provincial et municipal, qui influencent la distribution des coûts entre les ménages.
- Le coût de l'énergie, fixé par la Régie de l'énergie, qui affecte les coûts d'opération.
- Les matériaux et équipements disponibles, déterminés par les fournisseurs et les entrepreneurs, auxquels sont associés un coût d'acquisition et un profil environnemental.
- La recherche et le développement menés dans le domaine de l'assainissement des eaux usées, duquel dépend l'introduction de nouvelles technologies sur le marché.
- Le niveau de connaissance des citoyens quant au fonctionnement du système, renforcé par la sensibilisation ou la couverture médiatique, qui joue un rôle important dans l'adoption de comportements responsables et l'acceptabilité des interventions.

- La capacité des autorités à faire respecter la réglementation et à promouvoir les comportements responsables.
- Le périmètre d'urbanisation ainsi que la densité du tissu urbain, spécifié par les autorités municipales et influencé par les promoteurs immobiliers, qui affecte le mode de collecte des eaux usées ainsi que les coûts associés au réseau.

À partir de l'évaluation des options considérées pour la modernisation du SMAEU de Deauville selon les trois volets du développement durable, quelques avenues permettant d'améliorer à moyen ou long terme sa performance ont été ciblées.

En premier lieu, l'atteinte d'une meilleure efficacité énergétique est cruciale pour améliorer la performance environnementale du SMAEU. Les interventions pour réduire le captage et l'infiltration dans le réseau permettraient non seulement de réduire la consommation d'électricité dans le réseau, mais augmenterait aussi le rendement à la station, car l'affluent y arriverait moins dilué. Favoriser le développement résidentiel dans les secteurs pouvant être desservis par la collecte gravitaire réduirait aussi la consommation d'électricité. À plus long terme, l'exploitation du contenu énergétique des eaux usées permettrait de transformer le SMAEU de Deauville en producteur net d'énergie. Ceci nécessiterait toutefois une reconfiguration majeure et l'utilisation de nouvelles technologies. Des gains environnementaux notables pourraient aussi découler d'approches innovantes dans la fabrication des matériaux et des équipements, par exemple l'utilisation d'ajouts cimentaires moins polluants dans le béton, la fabrication des conduites à partir de plastique recyclé ou la fabrication d'équipements à partir de métaux recyclés. À la station, une vidange plus fréquente des boues diminuerait les émissions de GES associées à leur digestion tandis que l'optimisation du processus de nitrification pourrait résulter en une volatilisation réduite de l'ammoniac.

Les mesures avancées pour améliorer l'efficacité énergétique du SMAEU auraient aussi pour effet de réduire les coûts en électricité. L'ampleur de ces gains serait toutefois limitée, car la main d'œuvre pour le suivi et l'entretien préventif accaparent une part importante des coûts pour la phase d'opération. L'utilisation des infrastructures existantes à leur pleine capacité, combinée avec un dimensionnement judicieux pour les futures interventions sur le système, permettrait aussi de réduire les coûts sur le cycle de vie. Il faudrait aussi réévaluer dans quelles conditions le traitement centralisé s'avère réellement préférable lorsque de nouvelles technologies dédiées au

traitement décentralisé ou communautaire apparaissent sur le marché, À plus long terme, la mise en place de technologies axées sur la récupération des nutriments et de l'énergie présents dans les eaux usées permettrait même de tirer certains revenus de l'exploitation du SMAEU. Finalement, les dépenses dans les infrastructures, soit la collecte des eaux usées, la distribution d'eau potable, le drainage des eaux pluviales et les routes, seraient probablement réduites en coordonnant la réfection ou les remplacements à l'échelle de la municipalité.

Un des principaux défis pour le volet social consiste à concilier les divers enjeux traités, soit l'acceptabilité, la promotion des comportements responsables, l'équité et le niveau de nuisances. Les quatre combinaisons envisagées pour la modernisation du SMAEU ont leurs points forts, mais aucune d'entre elles n'offre une performance élevée selon l'ensemble des critères. Il apparaît aussi essentiel de clarifier quelle interprétation font l'ensemble des parties prenantes de concepts fondamentaux, tels l'acceptabilité et l'équité, pour en faciliter l'évaluation. Malgré certaines lacunes, les options envisagées pour le SMAEU affichent une bonne performance selon le volet social. Il apparaît ainsi crucial de la maintenir ou de l'accroître si des initiatives visant à améliorer la performance selon les volets environnemental et économique sont implantées.

Dimension 6 : Aide à la décision

La prise de décision est grandement facilitée dans la situation où une option se démarque clairement des autres selon l'ensemble des critères considérés. Toutefois, ceci n'était pas le cas pour la comparaison des options envisagées pour la modernisation du SMAEU de Deauville. Comme chacune d'entre elles affichait certaines forces et faiblesses, des compromis entre les volets se sont ainsi avérés nécessaires. À cet égard, différentes avenues ont été explorées pour identifier quelle combinaison d'options était préférable.

Trois issues différentes auraient pu découler des quatre approches proposées et ceci fait ressortir l'influence que peuvent avoir les particularités de méthodes d'aide à la décision sur les recommandations. Une méthode d'aide à la décision doit donc servir à structurer et rendre plus explicite les préférences des décideurs, mais ne peut évidemment pas s'y substituer. Au-delà de l'identification de la meilleure (ou moins pire) combinaison d'options, l'utilisation des teintes de durabilité a aussi permis de conclure que celles-ci amenaient des améliorations limitées selon la plupart des volets du développement durable par rapport au SMAEU existant. En dernier lieu, la discussion sur la prise de décision a permis de mieux saisir un défi particulier associé au contexte

du développement durable, soit celui de trouver un équilibre entre les préférences «subjectives» des décideurs (par exemple la prépondérance du volet économique) et les obligations «normatives» (par exemple la recherche d'une performance équilibrée selon les trois volets).

Si l'on s'attarde au contexte dans lequel les infrastructures urbaines sont mises en place, il est facile de constater que plusieurs acteurs sont impliqués et que les décisions se prennent à différents niveaux. Tout d'abord, des pressions peuvent être exercées sur les municipalités pour diminuer le plus possible les coûts de construction, que ce soit par les paliers gouvernementaux supérieurs ou les citoyens. Une telle approche ne garantit toutefois pas que les coûts sur le cycle de vie seront minimisés. De plus, les programmes de subvention visent le traitement centralisé et seules les dépenses engagées pour les conduites, les postes de pompage et les stations d'épuration sont admissibles. Par conséquent, les modes alternatifs de collecte et de traitement sont peu subventionnés et s'avèrent moins intéressants pour les municipalités ou leurs citoyens.

Ensuite, comme les mandats pour la conception sont attribués aux firmes de génie-conseil, la réalisation d'évaluations selon des critères de développement durable doivent être spécifiée dans l'appel d'offres si elles sont requises. Évidemment, les entreprises qui soumissionnent doivent démontrer qu'elles ont à leur disposition les compétences requises pour la réalisation de telles analyses. Même dans la circonstance où les coûts se voient accordés une forte importance, de nombreux facteurs peuvent influencer les recommandations, par exemple la durée de vie des infrastructures, la période ou le taux d'actualisation, la prise en compte des subventions ou des coûts externes ainsi que les projections pour les coûts futurs. Finalement, la nature des compétences confiées aux municipalités par le gouvernement provincial implique que les décisions prises à ce niveau ont des effets directs et immédiats sur les citoyens. Des solutions impopulaires, susceptibles de nuire aux élus, sont donc plus difficiles à mettre en œuvre. Dans cette situation, il est pertinent d'informer les citoyens et d'implanter progressivement des initiatives nécessitant des changements de comportement.

Chapitre 8 CONCLUSION

Ce chapitre de la thèse permet de tirer les grandes conclusions tout en faisant le retour sur les travaux effectués, mettant en évidence les contributions originales de la recherche et identifiant les perspectives de recherche découlant des résultats obtenus ou des questionnements soulevés.

8.1 Sommaire des travaux

Deux thèmes ont été couverts dans cette thèse, soit l'intégration des principes du développement durable à la pratique de l'ingénierie et la conception des systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées (SMAEU) selon ces principes. Parmi les trois objectifs des travaux de recherche, deux se rattachaient au premier thème. Ils visaient la proposition d'un processus intégré de conception durable pour l'ingénierie (PICDI) ainsi que l'élaboration d'une approche permettant d'évaluer la progression de la conception conventionnelle vers la conception durable. Le dernier objectif, en lien avec le deuxième thème, consistait à démontrer l'utilité du PICDI et de l'approche permettant d'évaluer le progrès vers la conception durable par une étude de cas. Celle-ci a porté sur le SMAEU de Deauville (Sherbrooke, Québec) desservant une petite communauté.

Au chapitre 3, les principes de l'ingénierie durable proposés dans la littérature ont été soumis à l'analyse de contenu thématique. Il en a résulté une liste structurée de 15 principes couvrant les trois dimensions du développement durable ainsi que leurs interfaces. La synthèse de concepts, modèles et théories sur les systèmes biophysiques et sociaux a pour sa part mené au cadre conceptuel sur l'ingénierie et le développement durable. Ce dernier sert à investiguer les liens existant entre les projets d'ingénierie et les multiples enjeux du développement durable. Les principes comme le cadre conceptuel jouent un rôle important dans le PICDI exposé au chapitre 4. Tout en comblant certaines lacunes des processus existants, le PICDI a été construit de manière à inclure les meilleures pratiques en conception durable. Les 21 tâches relatives à la conception durable, complémentaires aux tâches conventionnelles, sont réparties entre les quatre étapes de la conception. La conception durable fait appel à un large éventail d'outils de développement durable et leur choix dépend de la nature des projets ainsi que de leur ampleur. L'utilité de certains des outils recensés dans la littérature a été mise en évidence par l'étude de cas du chapitre 7 pour chacune des étapes du PICDI.

À partir des tâches clés du PICDI et des procédures permettant de valider les méthodes de conception, six dimensions propres à la conception durable ont été identifiées : (1) la structure

du processus de conception; (2) la gamme d'enjeux relatifs au développement durable considérés; (3) la pertinence des indicateurs retenus; (4) la précision des outils utilisés pour l'évaluation des indicateurs; (5) la performance des options par rapport aux solutions conventionnelles; et (6) la prise de décision. Ces dimensions permettent de distinguer la conception conventionnelle de la conception durable de manière structurée à l'aide de quatre teintes, allant d'une application minimale à une application totale. À prime abord, les dimensions ont été élaborées pour jeter un regard critique sur les pratiques en conception à l'échelle du projet. Elles peuvent aussi être intégrées à la réflexion stratégique d'une organisation désirent progresser selon les teintes au fil des projets.

L'application du PICDI au SMAEU de Deauville a été précédée au chapitre 5 d'une revue de littérature sur l'évaluation de la durabilité et la conception durable dans le domaine de l'assainissement des eaux usées. Les meilleures pratiques et les conclusions mentionnées dans les études recensées ont permis d'orienter l'évaluation du SMAEU de Deauville existant selon une série de critères techniques et de développement durable. Tel que présenté au chapitre 6, de nombreux outils ont été utilisés dans cette évaluation, soit l'analyse environnementale du cycle de vie (AECV), l'analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV), l'analyse de la valeur accordée aux biens et services environnementaux, l'analyse distributionnelle ainsi que la consultation d'experts et de parties prenantes. L'évaluation technique a démontré que le réseau de collecte et la station d'épuration étaient exploités à un niveau près de ou excédant leur capacité de conception. L'importance des débits parasites dans le réseau le rend vulnérable lors de fortes précipitations ou en période de fonte. Le respect des exigences de rejet à la station est pour sa part assuré de justesse en conditions hivernales. Vu leur configuration, la flexibilité et l'adaptabilité sont des points faibles autant pour le réseau que pour la station.

Les impacts environnementaux estimés par l'AECV ont fait ressortir l'importance de la phase d'opération, tout particulièrement celle du réseau à cause des contraintes à la collecte gravitaire et des forts débits parasites. En contrepartie, les coûts sur le cycle de vie étaient en grande partie associés à la construction du réseau, vu la faible densité résidentielle et les nombreux postes de pompage. Les coûts évalués par l'ACCV se sont néanmoins avérés inférieurs à la valeur accordée par les citoyens aux services rendus par le SMAEU. L'analyse distributionnelle a pour sa part permis d'évaluer que la contribution des ménages au financement du SMAEU était approximativement proportionnelle à leur revenu, ce qui implique plus une grande contribution

des ménages riches en termes absolus. Selon le volet social, les parties prenantes ont identifié la contribution à la sensibilisation et aux connaissances, l'adoption de comportements responsables et la génération de nuisances comme les principaux points faibles du SMAEU.

Le PICDI, à l'exception de la conception détaillée, a été appliqué au chapitre 7 pour expliciter le contenu de ses tâches et illustrer comment étaient évaluées les six dimensions de la conception durable. À de nombreux égards, la mise en œuvre du PICDI a été facilitée par l'évaluation du SMAEU existant. En fonction des résultats présentés au chapitre 6 et du contexte, cinq solutions ont été proposées en vue de la modernisation du SMAEU. Les options retenues pour le réseau de collecte, soit la construction d'un bassin de rétention et le débranchement des drains de fondation, sont complémentaires à celles considérées pour la station d'épuration, soit la mise en place d'un étang aéré supplémentaire, d'un bioréacteur ou de l'isolation des étangs. Quatre combinaisons, chacune misant sur une option pour le réseau et une pour la station, en découlent. Une bonne connaissance des particularités techniques des options s'est avérée cruciale à leur analyse selon les critères de développement durable.

L'évaluation de la durabilité des options pour la modernisation du SMAEU a donné des résultats similaires à ceux obtenus pour le système existant. D'après l'AECV, la phase d'opération (réseau et station) est prépondérante et la magnitude des impacts potentiels est sensible au choix du mélange énergétique. Les coûts sur le cycle de vie du réseau sont surtout associés au réseau, mais contrairement au SMAEU existant, l'opération est plus importante que la construction car toutes les options tirent profit des infrastructures actuelles. Pour le volet social, les options étudiées affichent toutes un profil différent, mais aucune ne se démarque vu leurs forces et leurs faiblesses respectives. Les performances d'ensemble selon le volet technique sont également semblables d'une option à l'autre. Des teintes acceptables ou élevées ont été atteintes pour la plupart des dimensions de la conception durable, ce qui démontre jusqu'à un certain point l'applicabilité du PICDI. Seule la dimension portant sur la performance des options a affiché des teintes plus faibles, surtout pour les volets économique et environnemental. Lorsque scrutées selon les teintes de la durabilité, les solutions axées sur la modernisation des infrastructures existantes, bien que variées, offrent des gains limités pour le système à l'étude. Le classement des options selon les teintes de durabilité dépendent toutefois du choix des valeurs pour les teintes conventionnelles et durables. Clairement, les résultats obtenus pour l'évaluation des options selon les critères de développement durable ont une influence déterminante sur le dénouement

du projet. Bien que cela soit moins évident, l'identification des enjeux et la génération des options ont aussi une grande importance, car ils affectent ce qui sera pris en compte et ce qui sera ignoré tout au long du processus de conception.

8.2 Contributions originales

La liste de principes pour l'ingénierie durable proposée au chapitre 3, basée sur la littérature dans le domaine, s'organise selon une structure originale et affiche une meilleure cohérence avec les interprétations du développement durable issues des domaines extérieurs au génie. Le cadre conceptuel a pour sa part la particularité d'être basé sur une approche systémique du développement durable, ce qui permet de bien situer les projets dans leur contexte socio-environnemental. Son exhaustivité est assurée par la prise en compte de concepts, modèles et théories issues de nombreuses disciplines. De plus, le cadre conceptuel est intégré au PICDI pour faciliter l'identification des enjeux pertinents à l'analyse des projets, une caractéristique absente des processus de conception durable recensés au chapitre 4. Deux éléments centraux de la thèse, soit le PICDI et les dimensions de la conception durable, sont exposés dans ce même chapitre.

Le PICDI, influencé par les meilleures pratiques en conception durable, se distingue des autres processus en exposant clairement les liens entre un large éventail d'outils de développement durable et les étapes de la conception. De plus, en complétant le PICDI avec les six dimensions de la conception durable, la présente thèse ne se limite pas à suggérer quelle forme devrait prendre celle-ci. Elle met également de l'avant une approche rendant possible la différenciation de la conception conventionnelle et durable selon différents niveaux. Transposer la dualité « conventionnel-durable » sur un continuum est non seulement plus exact, mais aussi plus utile, car cela permet de mettre l'accent sur l'identification des faiblesses des pratiques actuelles et sur leur amélioration continue.

L'évaluation du SMAEU de Deauville réalisée au chapitre 6 se distingue des études recensées dans la littérature, car elle cible une petite communauté, inclut tous les sous-systèmes participants à l'assainissement et fait appel à une gamme étendue d'outils de développement durable. Par l'intermédiaire de l'AECV et l'ACCV, des résultats éclairants ont été obtenus sur des technologies non considérées dans les études existantes, autant pour la collecte des eaux usées (réseau basse pression et sous vide) que pour leur traitement (station de type étangs aérés facultatifs). Ceci est d'autant plus pertinent dans un contexte québécois, car l'utilisation des

étangs aérés est répandue. La mise en œuvre conjointe de la technique d'évaluation des contingences et de l'ACCV constitue également un aspect original de la recherche. Elle s'est avérée utile autant lors de l'évaluation du SMAEU existant que pour l'évaluation des options considérées en vue de sa modernisation. En dernier lieu, les résultats obtenus par l'analyse de la distribution des coûts d'une infrastructure municipale sur les ménages desservis sont les premiers du genre recensés dans la littérature.

La conception menée pour le projet de modernisation du SMAEU de Deauville est la première application détaillée du PICDI à une problématique concrète. L'étude de cas a permis de documenter la réalisation de chacune des tâches de la conception durable et d'illustrer comment étaient évaluées les dimensions selon les teintes proposées au chapitre 4. Il en ressort également l'évaluation exhaustive d'options pertinentes pour la modernisation des SMAEU québécois selon des critères de développement durable. De plus, certaines des options envisagées, soit le débranchement des drains de fondation et l'isolation des étangs aérés, n'avaient jamais fait l'objet d'AECV ou d'ACCV. En dernier lieu, l'application du PICDI a permis d'identifier de nombreux freins et leviers à la conception durable, la plupart dépendant de facteurs hors du rayon d'influence directe d'une équipe de conception.

8.3 Perspectives de recherche

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont clairement établi en quoi consistait la conception durable, en plus d'illustrer son application par une étude de cas détaillée. La suite logique consisterait à en évaluer le degré de mise en œuvre dans la pratique par une consultation élargie des ingénieurs. Comme plusieurs raisons portent à croire que la conception durable est actuellement peu répandue, cette consultation pourrait aussi servir à identifier comment améliorer cette situation. Quelques thèmes auraient tout avantage à être abordés, notamment le niveau de connaissance des ingénieurs sur le concept ou les outils de développement durable, l'importance accordée par ceux-ci aux enjeux du développement durable, la contribution à ces enjeux des projets d'ingénierie réalisés actuellement ainsi que les besoins en formation ou en services spécialisés.

Les dimensions de la conception durable définies offrent aussi un cadre tout désigné pour documenter et évaluer les meilleures pratiques en ingénierie à partir d'une série de projets récents, de manière à en identifier les forces et faiblesses. Le processus décisionnel constitue une

dimension particulièrement intéressante, car il se fonde sur des interactions entre le personnel technique menant le processus de conception et les décideurs ou les parties prenantes. Explorer le processus décisionnel propre aux projets techniques, autant dans le secteur public que privé, permettrait d'identifier comment y arrimer les tâches du PICDI plus efficacement. De nombreuses approches pourraient être étudiées, notamment l'implication des décideurs ou des parties prenantes dans le processus de conception ou la communication des résultats issus d'évaluations de durabilité dans un format compréhensible par tous. Évidemment, l'implantation de nouvelles approches ou technologies requiert de vaincre une certaine résistance au changement. Il serait donc intéressant d'investiguer certaines stratégies proposées à cet effet.

L'application du PICDI à la modernisation du SMAEU a illustré que la conception durable demandait des ressources additionnelles lorsque comparé à la conception durable. L'utilisation du PICDI dans diverses situations permettrait de mieux évaluer l'ampleur de l'effort requis, les coûts qui y sont associés ainsi que les gains qui en découlent. Différentes stratégies destinées à optimiser cet effort, survolées au chapitre 7, pourraient aussi être investiguées. Par exemple, l'utilisation de données génériques ou d'assemblages issus de projets antérieurs, la création d'équipes multidisciplinaires ou la réalisation d'analyses simplifiées. Ces études de cas permettraient aussi de mieux caractériser les freins et leviers à la conception durable, d'après les résultats obtenus et les perceptions d'une gamme étendue d'intervenants.

L'évaluation du SMAEU existant ainsi celle des options envisagées pour sa modernisation selon des critères de développement durable ont indiqué certaines lacunes du mode de gestion des eaux usées actuel. Pour déterminer s'il est possible de généraliser les observations faites dans l'étude de cas, il serait nécessaire de scruter une gamme variée de SMAEU à l'aide d'un ensemble uniforme d'indicateurs. Ceci permettrait aussi de mettre en évidence les filières affichant les meilleures performances. Il est toutefois probable qu'aucune des technologies actuellement disponibles au Québec ne permette d'atteindre les teintes de durabilité les plus élevées. Des projets de démonstration misant sur le traitement local ainsi que la valorisation de l'énergie et des nutriments permettrait l'évaluation de telles technologies ainsi que leur comparaison aux approches conventionnelles. Des études de ce genre ont été réalisées dans quelques pays européens, mais il est difficile, voire impossible, de transposer les résultats obtenus vu les différences avec le contexte québécois. Autant la modernisation des SMAEU existants que la mise

en place de nouvelles installations pourraient être traitées, pour faire ressortir le potentiel et les difficultés associées à chaque situation.

De façon plus spécifique au SMAEU de Deauville, des travaux complémentaires à ceux réalisés dans cette thèse seraient nécessaires pour caractériser de manière plus précise la performance des technologies mobilisées par celui-ci. Ainsi, l'étude plus approfondie des émissions atmosphériques aux stations de type étangs aérés facultatifs permettrait de raffiner l'AECV, tout comme la caractérisation plus précise des interventions et des gains associés au débranchement des drains de fondation. Une meilleure connaissance des activités ayant lieu lors de la fin de vie des SMAEU viendrait aussi combler une lacune soulevée dans de nombreuses études.

En conclusion, l'ingénierie durable s'est avéré être un thème de recherche aux nombreuses ramifications. Ainsi, l'étendue des travaux de recherche ont dû être circonscrits pour répondre en priorité aux objectifs posés initialement. Néanmoins, un nombre élevé de questions ont été abordées à l'aide de méthodes et techniques issues de nombreuses disciplines. La coordination de tous ces outils dans un contexte de conception en ingénierie constitue d'ailleurs un des principaux aspects originaux de la thèse. Grâce à cette richesse multidisciplinaire, la recherche menée a ouvert plusieurs pistes, par exemple l'évaluation de projets d'ingénierie actuellement en cours à l'aide des teintes de la conception durable, l'évaluation d'une gamme plus étendue de SMAEU québécois à l'aide de critères de développement durable et la réalisation d'AECV plus approfondies sur des stations d'épuration de type étangs aérés. Par le fait même, les travaux ont fourni de solides ancrages pour la conception durable, autant pour la pratique de l'ingénierie en général que pour son application plus pointue dans le domaine de l'assainissement des eaux usées.

ANNEXE A – PRINCIPES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

A.1 Principes recensés dans la littérature

Référence	Principes
[A] World Commission on Environment and Development (1987)	(1) Reviving growth in developing countries; (2) changing the quality of growth; (3) meeting essential needs for jobs, food, energy, water, and sanitation; (4) ensuring a sustainable level of population; (5) conserving and enhancing the resource base; (6) reorienting technology and managing risk; (7) merging environment and economics in decision making.
[B] Ceres (1989)	(1) Protection of the biosphere; (2) Sustainable use of natural resources; (3) Waste reduction and disposal; (4) Energy conservation; (5) Risk reduction; (6) Safe products and services; (7) Environmental restoration; (8) Information for the public; (9) Management commitment; (10) Audits and reports.
[C] United Nations (1992)	(1) Human beings are at the centre of concerns for sustainable development. They are entitled to a healthy and productive life in harmony with nature; (2) States have the sovereign right to exploit their own resources pursuant to their own environmental and developmental policies, and the responsibility to ensure that activities within their jurisdiction or control do not cause damage to the environment of other States or of areas beyond the limits of national jurisdiction. (3) The right to development must be fulfilled so as to equitably meet developmental and environmental needs of present and future generations. (4) In order to achieve sustainable development, environmental protection shall constitute an integral part of the development process and cannot be considered in isolation from it. (5) All States and all people shall cooperate in the essential task of eradicating poverty as an indispensable requirement for sustainable development, in order to decrease the disparities in standards of living and better meet the needs of the majority of the people of the world. (6) The special situation and needs of developing countries shall be given special priority. International actions in the field of environment and development should also address the interests and needs of all countries. (7) States shall cooperate in a spirit of global partnership to conserve, protect and restore the health and integrity of the Earth's ecosystem. In view of the different contributions to global environmental degradation, States have common but differentiated responsibilities. The developed countries acknowledge the responsibility that they bear in the international pursuit to sustainable development in view of the pressures their societies place on the global environment and of the technologies and financial resources they command. (8) To achieve sustainable development and a higher quality of life for all people, States should reduce and eliminate unsustainable patterns of production and consumption and promote appropriate demographic policies. (9) States should cooperate to strengthen endogenous capacity-building for sustainable development by improving scientific understanding through exchanges of scientific and technological knowledge, and by enhancing the development, adaptation, diffusion and transfer of technologies, including new and innovative technologies. (10) Environmental issues are best handled with participation of all concerned citizens, at the relevant level. At the national level, each individual shall have appropriate access to information concerning the environment that is held by public authorities, including information on hazardous materials and activities in their communities, and the opportunity to participate in decision-making processes. States shall facilitate and encourage public awareness and participation by making information widely available. Effective access to judicial and administrative proceedings, including redress and remedy, shall be provided. (11) States shall enact effective environmental legislation. Environmental standards, management objectives and priorities should reflect the environmental and development context to which they apply. Standards applied by some countries may be inappropriate and of unwarranted economic and social cost to other countries, in particular developing countries. (12) States should cooperate to promote a supportive and open international economic system that would lead to economic growth and sustainable development in all countries, to better address the problems of environmental degradation. Trade policy measures for environmental purposes should not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade. Unilateral actions to deal with environmental challenges outside the jurisdiction of the importing country should be avoided. Environmental measures addressing transboundary or global environmental problems should, as far as possible, be based on an international consensus. (13) States shall develop national law regarding liability

	<p>and compensation for the victims of pollution and other environmental damage. States shall also cooperate in an expeditious and more determined manner to develop further international law regarding liability and compensation for adverse effects of environmental damage caused by activities within their jurisdiction or control to areas beyond their jurisdiction. (14) States should effectively cooperate to discourage or prevent the relocation and transfer to other States of any activities and substances that cause severe environmental degradation or are found to be harmful to human health. (15) In order to protect the environment, the precautionary approach shall be widely applied by States according to their capabilities. Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation. (16) National authorities should endeavour to promote the internalization of environmental costs and the use of economic instruments, taking into account the approach that the polluter should, in principle, bear the cost of pollution, with due regard to the public interest and without distorting international trade and investment. (17) Environmental impact assessment, as a national instrument, shall be undertaken for proposed activities that are likely to have a significant adverse impact on the environment and are subject to a decision of a competent national authority. (18) States shall immediately notify other States of any natural disasters or other emergencies that are likely to produce sudden harmful effects on the environment of those States. Every effort shall be made by the international community to help States so afflicted. (19) States shall provide prior and timely notification and relevant information to potentially affected States on activities that may have a significant adverse transboundary environmental effect and shall consult with those States at an early stage and in good faith. (20) Women have a vital role in environmental management and development. Their full participation is therefore essential to achieve sustainable development. (21) The creativity, ideals and courage of the youth of the world should be mobilized to forge a global partnership in order to achieve sustainable development and ensure a better future for all. (22) Indigenous people and their communities and other local communities have a vital role in environmental management and development because of their knowledge and traditional practices. States should recognize and duly support their identity, culture and interests and enable their effective participation in the achievement of sustainable development. (23) The environment and natural resources of people under oppression, domination and occupation shall be protected. (24) Warfare is inherently destructive of sustainable development. States shall therefore respect international law providing protection for the environment in times of armed conflict and cooperate in its further development, as necessary. (25) Peace, development and environmental protection are interdependent and indivisible. (26) States shall resolve all their environmental disputes peacefully and by appropriate means in accordance with the Charter of the United Nations. (27) States and people shall cooperate in good faith and in a spirit of partnership in the fulfilment of the principles embodied in this Declaration and in the further development of international law in the field of sustainable development.</p>
[D] Haughton (1999)	(1) Equity within and (2) between generations; (3) Geographic equity or cross-border responsibility; (4) Procedural equity and (5) Equity between species composing biodiversity.
[E] Earth Charter Initiative (2000)	<p>I. RESPECT AND CARE FOR THE COMMUNITY OF LIFE (GENERAL) (1) Respect Earth and life in all its diversity. (2) Care for the community of life with understanding, compassion, and love. (3) Build democratic societies that are just, participatory, sustainable, and peaceful. (4) Secure Earth's bounty and beauty for present and future generations.</p> <p>II. ECOLOGICAL INTEGRITY (5) Protect and restore the integrity of Earth's ecological systems, with special concern for biological diversity and the natural processes that sustain life. (6) Prevent harm as the best method of environmental protection and, when knowledge is limited, apply a precautionary approach. (7) Adopt patterns of production, consumption, and reproduction that safeguard Earth's regenerative capacities, human rights, and community well-being. (8) Advance the study of ecological sustainability and promote the open exchange and wide application of the knowledge acquired.</p> <p>III. SOCIAL AND ECONOMIC JUSTICE (9) Eradicate poverty as an ethical, social, and environmental imperative. (10) Ensure that economic activities and institutions at all levels promote human development in an equitable and sustainable manner. (11) Affirm gender equality and equity as prerequisites to sustainable development and ensure universal access to education, health care, and economic opportunity.</p>

	<p>(12) Uphold the right of all, without discrimination, to a natural and social environment supportive of human dignity, bodily health, and spiritual well-being, with special attention to the rights of indigenous peoples and minorities.</p> <p>IV. DEMOCRACY, NONVIOLENCE, AND PEACE</p> <p>(13) Strengthen democratic institutions at all levels, and provide transparency and accountability in governance, inclusive participation in decision making, and access to justice. (14) Integrate into formal education and life-long learning the knowledge, values, and skills needed for a sustainable way of life. (15) Treat all living beings with respect and consideration. (16) Promote a culture of tolerance, nonviolence, and peace.</p>
[F] Valentin and Spangenberg (2000)	<p>(1) Strengthen participation; (2) Safeguard cohesion; (3) Limit throughput; (4) Improve competitiveness.</p> <p>(5) Human right to resource access; (6) Participative democracy; (7) Fair burden and benefit sharing; (8) Care of organizations for environmental protection; (9) Improve physical efficiency of the economy; (10) Fair markets.</p>
[G] Robèrt et al. (2002)	<p>In a sustainable society, nature is not subject to systematically increasing: (1) concentrations of substances extracted from the earth's crust; (2) concentrations of substances produced by society; (3) degradation by physical means (4) and in that society, people are not subject to conditions that systemically undermine their capacity to meet their needs.</p> <p>(5) Use of backcasting for envisioning a sustainable future; (6) Provide flexible platforms; (7) Seek a good return on investment; (8) Apply the precautionary principle; (9) Dialogue and encouragement; (10) Transparency; (11) Political means; (12) Differentiated taxes on unwanted physical input or output flows; (13) Getting rid of perverse subsidies; (14) Eliminate traditional privileges and impose public charges on resource extraction; (15) Promote lighter and evolutive norms and standards; (16) Reaching international agreements for global issues; (17) Account the full costs associated with international trade; (18) Law enforcement to protect our global commons should be applied when all other possibilities are exhausted.</p>
[H] Parris and Kates (2003)	<p>Sustain nature for its intrinsic qualities: (1) Earth; (2) Biodiversity; (3) Ecosystems. Sustain life support systems for their utilitarian value: (4) Ecosystems services; (5) Resources; (6) Environment. Sustain communities: (7) Cultures; (8) Groups; (9) Places. Develop people: (10) Child survival; (11) Life expectancy; (12) Education; (13) Equity; (14) Equal opportunity. Develop economy: (15) Wealth; (16) Productive sectors; (17) Consumption. Develop society: (18) Institutions; (19) Social capital; (20) States; (21) Regions.</p>
[I] Becker (2005)	<p>Resilience: (1) Diversity; (2) Stability; (3) Adaptability. Auto-sufficiency: (4) Carrying capacity; (5) Low entropy; (6) Integrated systems. Collaboration: (7) Inclusivity; (8) Compatibility; (9) Contribution.</p>
[J] Swiss Federal Statistical Office (2005)	<p>(1a) Ensuring human rights: Each member of society has a right to the dignity of human life and to the free development of their personality. Democracy, legal stability and cultural diversity are guaranteed. (1b) Limited individual freedom: The limits of individual development are set where the human dignity of other contemporary individuals or of future generations is compromised. (2a) Meeting needs: The basic needs of the population must be met over the long term. Individuals should be permitted reasonable latitude in meeting material and non-material needs which extend beyond the basic needs. (2b) Promoting health: Human health should be protected and promoted. (2c) Fighting poverty: The dignity of human life requires freedom from poverty. Needy members of society shall benefit from solidarity in accordance with their needs. (3a) Satisfaction and happiness: Possibilities for present and future generations to find satisfaction and happiness in life should be maintained and promoted. (3b) Development that takes well-being into account: Socioeconomic and environmental change must not be achieved at the cost of the physical and psychological well-being of the individual. (4a) Ban on discrimination: No one shall be discriminated against on the basis of whatever external or internal characteristic. (4b) Equal opportunities and fair distribution of wealth: Each member of society should have the same rights and opportunities. Society should strive to achieve a more just distribution of resources. (4c) Integration of the less fortunate: The integration of disadvantaged groups of the population and regions into economic, social, cultural and political life should be promoted. (5a) Intercultural and interpersonal understanding: In recognition of the fact that the proper functioning and survival ability of society are substantially based upon the solidarity of its members, exchange and understanding between individuals and groups should be promoted. (5b) Social and political participation: Social and political participation should be promoted. (6a) Development</p>

cooperation: In developing countries and transition countries sustainable development shall be promoted by way of poverty alleviation. Assistance shall be provided in particular to the poorest developing countries, regions and people. (6b) Promoting peace and democracy: Peaceful coexistence of peoples and nations, respect for human rights and democracy should be promoted. (7a) Development of human capital: Collective knowledge and sociocultural heritage should be maintained and increased over the long term. (7b) Access to information and freedom of opinion: There should be no restriction to the flow of information. Free formation and expression of opinion must be guaranteed. (7c) Encouraging learning: The ability to absorb and process information should be promoted. (7d) Child-friendly environment: Children and young people in particular should be able to live in an open, motivating and future-oriented environment.

(8) Economic order in favour of the communal good: Economic activity should effectively and efficiently meet the needs of the individual and of society. The economic framework should be shaped in such a manner that it promotes personal initiative, thus putting self-interest to the service of the common good and ensuring the welfare of the present and future population. (9a) Market as economic order: Goods allocation should primarily be by free market means. If the market fails or in the case of goods primarily in the public interest (merit goods), intervention in the free market is justified. (9b) Genuine costs and principle of polluter-pays: Prices should reflect the scarcity of natural resources and sinks and include external costs. The "polluter pays" principle should be applied consistently (with the exception of merit goods). (9c) Market intervention that conforms to the system: In the case of market intervention, market-economy tools should be chosen above all others. (10a) Promotion of economic efficiency: The economic efficiency of a society and its productive, social and human capital must be at least maintained over time. The aim should not merely be to bring about an increase in quantity, but instead to ensure a constant improvement in quality. (10b) Economic order that favours innovation and competition: The framework of the market system should be shaped in such a manner that innovation is encouraged and functional markets are maintained or improved. Competitiveness and locational quality should be maintained and promoted. (10c) Promotion of research: Research and development activities which support sustainable development should be promoted. (10d) Limited public debt: Public sector debt must be incurred only to the extent that it does not jeopardise the capability of future generations to meet individual and social needs. (11a) Predictability of changes in the system: The framework of the market system should be shaped in such a manner that a long-term outlook is worthwhile and the social change necessary to adapt to future requirements is facilitated. New measures should be foreseeable. (11b) Socially compatible rate of change: The rapidity or slowness of changes in the framework of the economic system must not jeopardise social peace. (12a) Ecologically acceptable production: Environmental impact and risks emanating from production plants should be minimised, while energy and material flows should be optimised. (12b) Ecologically and socially acceptable consumption: Consumption of goods and services should be as environmentally compatible and socially just as possible. (12c) Transparent business reporting for consumers: Within and outside manufacturing companies information should be made available that serves to ensure sustainable development and consumption, e.g. through environmental management systems. (13) Employment that is morally worthwhile and provides a decent living: The economic system should ensure that anyone desiring gainful employment is able to find meaningful work to support themselves. (14a) Environmentally and socially acceptable world trade: The multilateral trading system should take account of the need for careful management of natural resources and promote technologies which ensure efficient use of environmental resources and social justice. (14b) World trade from which all parties can profit: The multilateral trading system should assist in ensuring that one nation's individual and social needs are met without consequently compromising the ability of other nations to meet their own needs.

(15a) Preservation of natural resources: The natural foundations of life should be maintained in the long term and existing damage should be repaired (15b) Preservation of biodiversity: The dynamic diversity of nature must be preserved. (16a) Limits for consumption of renewable resources: Consumption of renewable resources should be kept below the regeneration threshold. (16b) Limits for consumption of non-renewable resources: Consumption of non-renewable resources should be kept below the development potential for renewable resources. (17a) Limits for degradable waste and toxins: Pollution of the environment with degradable waste and pollutants should be minimised. Contamination should on no account exceed the

	<p>absorption capacity of the ecosystem. (17b) Avoidance of non-degradable toxins: The emission of non-degradable pollutants into the environment should be prevented wherever possible. (18a) Ecological compensation: Any impairment to nature should be offset such that biodiversity is maintained and the quality and continuity of the ecosystem are ensured. (18b) Minimisation of ecological risks: Accident risks with wide-ranging impact upon humans and the biosphere are permissible only insofar as, even in the worst case scenario, they do not cause any permanent damage for a subsequent generation. (18c) Caution in the case of uncertainty: Severe or irreversible environmental damage should be prevented, even if the scientific community is not absolutely certain of the actual risk. (19) Taking into consideration the time needed for natural processes: The rate of anthropogenic intervention in nature must be in balance with the tempo of the natural processes of relevance to the environment's capacity to respond and regenerate. (20) Acceptable natural and agricultural landscapes: Development of the natural habitat of humans must be guided by the concept of human rights. Human dignity requires a decent natural and agricultural landscape.</p>
[K] United Kingdom Government (2005)	<p>(1) Living within environmental limits; (2) Ensuring a strong, healthy and just society; (3) Achieving a sustainable economy; (4) Promoting good governance; and (5) Using sound science responsibly.</p>
[L] Government of Manitoba (1997)	<p>Integration of Environmental and Economic Decisions: (1) Economic decisions should adequately reflect environmental, human health and social effects; (2) Environmental and health initiatives should adequately take into account economic, human health and social consequences.</p> <p>Stewardship: (3) The economy, the environment, human health and social well-being should be managed for the equal benefit of present and future generations. (4) Manitobans are caretakers of the economy, the environment, human health and social well-being for the benefit of present and future generations. (5) Today's decisions are to be balanced with tomorrow's effects.</p> <p>Shared Responsibility and Understanding: (6) Manitobans should acknowledge responsibility for sustaining the economy, the environment, human health and social well-being, with each being accountable for decisions and actions in a spirit of partnership and open cooperation. (7) Manitobans share a common economic, physical and social environment. (8) Manitobans should understand and respect differing economic and social views, values, traditions and aspirations. (9) Manitobans should consider the aspirations, needs and views of the people of the various geographical regions and ethnic groups in Manitoba, including aboriginal peoples, to facilitate equitable management of Manitoba's common resources.</p> <p>Prevention: (10) Manitobans should anticipate, and prevent or mitigate, significant adverse economic, environmental, human health and social effects of decisions and actions, having particular careful regard to decisions whose impacts are not entirely certain but which, on reasonable and well-informed grounds, appear to pose serious threats to the economy, the environment, human health and social well-being.</p> <p>Conservation and Enhancement: (11) Manitobans should maintain the ecological processes, biological diversity and life-support systems of the environment; (12) Manitobans should harvest renewable resources on a sustainable yield basis; (13) Manitobans should make wise and efficient use of renewable and non-renewable resources; and (14) Manitobans should enhance the long-term productive capability, quality and capacity of natural ecosystems.</p> <p>Rehabilitation and Reclamation: (15) Manitobans should endeavour to repair damage to or degradation of the environment and consider the need for rehabilitation and reclamation in future decisions and actions.</p> <p>Global Responsibility: (16) Manitobans should think globally when acting locally, recognizing that there is economic, ecological and social interdependence among provinces and nations, and working cooperatively, within Canada and internationally, to integrate economic, environmental, human health and social factors in decision-making while developing comprehensive and equitable solutions to problems.</p>
[M] Government of Quebec (2006)	<p>(1) La protection de la santé et l'amélioration de la qualité de vie; (2) l'équité intra et intergénérationnelle; (3) la protection de l'environnement; (4) l'efficacité économique; (5) la participation et l'engagement des citoyens et des groupes; (6) l'accès au savoir; (7) la délégation des pouvoirs et des responsabilités au niveau approprié d'autorité; (8) le</p>

	<p>partenariat et la coopération intergouvernementale; (9) la prévention des risques à la source; (10) le principe de précaution; (11) la protection du patrimoine culturel; (12) la préservation de la biodiversité; (13) le respect de la capacité de support des écosystèmes; (14) rendre la production et la consommation plus responsables; (15) le principe pollueur-payeur; (16) l'internalisation des coûts dans la valeur des biens et services.</p>
[N] Villeneuve (2006)	<p>(1) Permettre de maintenir ou d'améliorer la qualité du milieu; (2) Contribuer à assurer la pérennité des ressources; (3) Générer une valeur ajoutée permettant de satisfaire une partie des besoins matériels d'une population; (4) Contribuer à diminuer les écarts entre les mieux nantis et les moins bien nantis d'une société donnée; (5) Contribuer à diminuer les écarts entre les mieux nantis et les moins nantis dans le monde; (6) Contribuer à améliorer l'autosuffisance des communautés; (7) Favoriser le transfert de connaissances et de richesses (y compris les richesses naturelles) d'une génération à l'autre; (8) Favoriser, à long terme, un équilibre démographique des régions permettant une occupation optimale du territoire, de façon à favoriser la qualité de la vie et des services à l'échelon des communautés.</p>

A.2 Catégorisation et synthèse des principes

Dimension	Principles
Env. (38)	<p>(A5) conserving and enhancing the resource base; (B1) Protection of the biosphere; (B7) Environmental restoration; (C4) In order to achieve sustainable development, environmental protection shall constitute an integral part of the development process and cannot be considered in isolation from it. (C7) States shall cooperate in a spirit of global partnership to conserve, protect and restore the health and integrity of the Earth's ecosystem. In view of the different contributions to global environmental degradation, States have common but differentiated responsibilities. The developed countries acknowledge the responsibility that they bear in the international pursuit to sustainable development in view of the pressures their societies place on the global environment and of the technologies and financial resources they command. (C15) In order to protect the environment, the precautionary approach shall be widely applied by States according to their capabilities. Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation. (C17) Environmental impact assessment, as a national instrument, shall be undertaken for proposed activities that are likely to have a significant adverse impact on the environment and are subject to a decision of a competent national authority. (D5) Equity between species composing biodiversity. (E1) Respect Earth and life in all its diversity. (E2) Care for the community of life with understanding, compassion, and love. (E5) Protect and restore the integrity of Earth's ecological systems, with special concern for biological diversity and the natural processes that sustain life. (E6) Prevent harm as the best method of environmental protection and, when knowledge is limited, apply a precautionary approach. (E15) Treat all living beings with respect and consideration. (F3) Limit throughput; (G1) nature is not subject to systematically increasing concentrations of substances extracted from the earth's crust; (G2) concentrations of substances produced by society; (G8) Apply the precautionary principle; Sustain nature for its intrinsic qualities: (H1) Earth; (H2) Biodiversity; (H3) Ecosystems. (I1) Diversity; (I4) Carrying capacity; (K1) Living within environmental limits. (J15a) Preservation of natural resources: The natural foundations of life should be maintained in the long term and existing damage should be repaired (J15b) Preservation of biodiversity: The dynamic diversity of nature must be preserved. (J17a) Limits for degradable waste and toxins: Pollution of the environment with degradable waste and pollutants should be minimised. Contamination should on no account exceed the absorption capacity of the ecosystem. (J17b) Avoidance of non-degradable toxins: The emission of non-degradable pollutants into the environment should be prevented wherever possible. (J18a) Ecological compensation: Any impairment to nature should be offset such that biodiversity is maintained and the quality and continuity of the ecosystem are ensured. (J18c) Caution in the case of uncertainty: Severe or irreversible environmental damage should be prevented, even if the scientific community is not absolutely certain of the actual risk. (L11) Manitobans should maintain the ecological processes, biological diversity and life-support systems of the environment; (L14) Manitobans should enhance the long-term productive capability, quality and capacity of natural ecosystems. (L15) Manitobans should endeavour to repair damage to or degradation of the environment and consider the need for rehabilitation and reclamation in future decisions and actions. (M3) la protection de l'environnement. (M10) le principe de précaution; (M9) la prévention des risques à la source; (M12) la préservation de la biodiversité; (M13) le respect de la capacité de support des écosystèmes. (N1) Permettre de maintenir ou d'améliorer la qualité du milieu.</p> <p>Synthesis : Preserve biodiversity and respect all life forms regardless of how useful they are to humankind. Stay within ecosystems' actual carrying capacity and restore damaged ecosystems.</p>
Env.-Econ. (29)	<p>(A7) merging environment and economics in decision making; (B2) Sustainable use of natural resources; (B3) Waste reduction and disposal; (B4) Energy conservation; (B5) Risk reduction; (C2) States have the sovereign right to exploit their own resources pursuant to their own environmental and developmental policies, and the responsibility to ensure that activities within their jurisdiction or control do not cause damage to the environment of other States or of areas beyond the limits of national jurisdiction. (C12) States should cooperate to promote a supportive and open international economic system that would lead to economic growth and sustainable development in all countries, to better address the problems of environmental degradation. Trade policy measures for environmental purposes should not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade. Unilateral actions to deal with environmental challenges outside the jurisdiction of the importing country should be avoided. Environmental measures addressing transboundary or global environmental problems should, as far as possible, be based on an</p>

	<p>international consensus. (C14) States should effectively cooperate to discourage or prevent the relocation and transfer to other States of any activities and substances that cause severe environmental degradation or are found to be harmful to human health. (C16) National authorities should endeavour to promote the internalization of environmental costs and the use of economic instruments, taking into account the approach that the polluter should, in principle, bear the cost of pollution, with due regard to the public interest and without distorting international trade and investment. (F9) <i>Improve physical efficiency of the economy</i>; (G3) nature is not subject to degradation by physical means. (G12) Differentiated taxes on unwanted physical input or output flows; (G13) Getting rid of perverse subsidies; (G14) Eliminate traditional privileges and impose public charges on resource extraction; (G15) Promote lighter and evolutive norms and standards; Sustain life support systems for their utilitarian value: (H4) Ecosystems services; (H5) Resources; (H6) Environment. (I2) Stability. (I5) Low entropy. (J9b) Genuine costs and principle of polluter-pays: Prices should reflect the scarcity of natural resources and sinks and include external costs. The "polluter pays" principle should be applied consistently (with the exception of merit goods). (J12a) Ecologically acceptable production: Environmental impact and risks emanating from production plants should be minimised, while energy and material flows should be optimised. (J16a) Limits for consumption of renewable resources: Consumption of renewable resources should be kept below the regeneration threshold. (J16b) Limits for consumption of non-renewable resources: Consumption of non-renewable resources should be kept below the development potential for renewable resources. (L12) Manitobans should harvest renewable resources on a sustainable yield basis; (L13) Manitobans should make wise and efficient use of renewable and non-renewable resources; (M15) le principe pollueur-payeur; (M16) l'internalisation des coûts dans la valeur des biens et services. (N2) Contribuer à assurer la pérennité des ressources.</p> <p>Synthesis : Replace non-renewable resources by renewable substitutes used below their regeneration rate. Use renewable and non-renewable resources in an efficient manner.</p>
<p>Econ. (19)</p>	<p>(A1) Reviving growth in developing countries; (A2) changing the quality of growth; (C9) States should cooperate to strengthen endogenous capacity-building for sustainable development by improving scientific understanding through exchanges of scientific and technological knowledge, and by enhancing the development, adaptation, diffusion and transfer of technologies, including new and innovative technologies. (F4) Improve competitiveness. (G6) Provide flexible platforms; (G7) Seek a good return on investment; Develop economy: (H15) Wealth; (H16) Productive sectors; (H17) Consumption. (I3) Adaptability. (I6) Integrated systems. (I8) Economic order in favour of the communal good: Economic activity should effectively and efficiently meet the needs of the individual and of society. The economic framework should be shaped in such a manner that it promotes personal initiative, thus putting self-interest to the service of the common good and ensuring the welfare of the present and future population. (J9a) Market as economic order: Goods allocation should primarily be by free market means. If the market fails or in the case of goods primarily in the public interest (merit goods), intervention in the free market is justified. (J9c) Market intervention that conforms to the system: In the case of market intervention, market-economy tools should be chosen above all others. (J10a) <i>Promotion of economic efficiency: The economic efficiency of a society and its productive, social and human capital must be at least maintained over time. The aim should not merely be to bring about an increase in quantity, but instead to ensure a constant improvement in quality.</i> (J10b) Economic order that favours innovation and competition: The framework of the market system should be shaped in such a manner that innovation is encouraged and functional markets are maintained or improved. Competitiveness and locational quality should be maintained and promoted. (J11a) Predictability of changes in the system: The framework of the market system should be shaped in such a manner that a long-term outlook is worthwhile and the social change necessary to adapt to future requirements is facilitated. New measures should be foreseeable. (M4) <i>l'efficacité économique</i>; (N3) Générer une valeur ajoutée permettant de satisfaire une partie des besoins matériels d'une population.</p> <p>Synthesis : Stimulate innovation on a continuous basis to facilitate the adaptation of the economic system. Maintain a positive, genuine, long term investment considering all types of capital.</p>
<p>Econ.-Soc. (25)</p>	<p>(A3) meeting essential needs for jobs, food, energy, water, and sanitation; (C3) The right to development must be fulfilled so as to equitably meet developmental and environmental needs of present and future generations. (C5) All States and all people shall cooperate in the essential task of eradicating poverty as an indispensable requirement for sustainable development, in order to decrease the disparities</p>

	<p><i>in standards of living and better meet the needs of the majority of the people of the world. (D1) Equity within generations; (E9) Eradicate poverty as an ethical, social, and environmental imperative. (E10) Ensure that economic activities and institutions at all levels promote human development in an equitable and sustainable manner. (F7) Fair burden and benefit sharing; (F10) Fair markets. (G4) people are not subject to conditions that systemically undermine their capacity to meet their needs. Develop people: (H13) Equity; (I8) Compatibility. (J2a) Meeting needs: The basic needs of the population must be met over the long term. Individuals should be permitted reasonable latitude in meeting material and non-material needs which extend beyond the basic needs. (J2c) Fighting poverty: The dignity of human life requires freedom from poverty. Needy members of society shall benefit from solidarity in accordance with their needs. (J4b) Equal opportunities and fair distribution of wealth: Each member of society should have the same rights and opportunities. Society should strive to achieve a more just distribution of resources. (J4c) Integration of the less fortunate: The integration of disadvantaged groups of the population and regions into economic, social, cultural and political life should be promoted. (J6a) Development cooperation: In developing countries and transition countries sustainable development shall be promoted by way of poverty alleviation. Assistance shall be provided in particular to the poorest developing countries, regions and people. (J10d) Limited public debt: Public sector debt must be incurred only to the extent that it does not jeopardise the capability of future generations to meet individual and social needs. (J11b) Socially compatible rate of change: The rapidity or slowness of changes in the framework of the economic system must not jeopardise social peace. (J13) Employment that is morally worthwhile and provides a decent living: The economic system should ensure that anyone desiring gainful employment is able to find meaningful work to support themselves. (J14b) World trade from which all parties can profit: The multilateral trading system should assist in ensuring that one nation's individual and social needs are met without consequently compromising the ability of other nations to meet their own needs. (N4) Contribuer à diminuer les écarts entre les mieux nantis et les moins bien nantis d'une société donnée; (N5) Contribuer à diminuer les écarts entre les mieux nantis et les moins nantis dans le monde; (N7) Favoriser le transfert de connaissances et de richesses (y compris les richesses naturelles) d'une génération à l'autre.</i></p> <p>Synthesis : Allocate in a fair manner benefits and costs related to economic activity and public policies. Organize work and commerce so that every human being can meet their needs.</p>
<p>Soc. (54)</p>	<p>(B9) Management commitment; (B10) Audits and reports; (C6) The special situation and needs of developing countries shall be given special priority. International actions in the field of environment and development should also address the interests and needs of all countries. (C20) Women have a vital role in environmental management and development. Their full participation is therefore essential to achieve sustainable development. (C21) The creativity, ideals and courage of the youth of the world should be mobilized to forge a global partnership in order to achieve sustainable development and ensure a better future for all. (C22) Indigenous people and their communities and other local communities have a vital role in environmental management and development because of their knowledge and traditional practices. States should recognize and duly support their identity, culture and interests and enable their effective participation in the achievement of sustainable development. (C24) Warfare is inherently destructive of sustainable development. States shall therefore respect international law providing protection for the environment in times of armed conflict and cooperate in its further development, as necessary. (C27) States and people shall cooperate in good faith and in a spirit of partnership in the fulfilment of the principles embodied in this Declaration and in the further development of international law in the field of sustainable development. (D4) Procedural equity. (E3) Build democratic societies that are just, participatory, sustainable, and peaceful. (E11) Affirm gender equality and equity as prerequisites to sustainable development and ensure universal access to education, health care, and economic opportunity. (E13) Strengthen democratic institutions at all levels, and provide transparency and accountability in governance, inclusive participation in decision making, and access to justice. (E14) Integrate into formal education and life-long learning the knowledge, values, and skills needed for a sustainable way of life. (E16) Promote a culture of tolerance, nonviolence, and peace. (F1) Strengthen participation; (F2) Safeguard cohesion; (F6) Participative democracy; (G9) Dialogue and encouragement; (G10) Transparency; (G11) Political means; Sustain communities: (H7) Cultures; (H8) Groups; Develop people: (H10) Child survival; (H11) Life expectancy; (H12) Education; (H14) Equal opportunity. Develop society: (H18) Institutions; (H19) Social capital; (H20) States and regions. (I7) Inclusivity; (I9) Contribution. (K2) Ensuring a strong, healthy and just society; (K4) Promoting good governance; (K5) Using sound science responsibly. (J1a) Ensuring human rights: Each member of society has a right to the dignity of human life and to the free development of their personality. Democracy, legal</p>

	<p>stability and cultural diversity are guaranteed. (J1b) Limited individual freedom: The limits of individual development are set where the human dignity of other contemporary individuals or of future generations is compromised. (J2b) Promoting health: Human health should be protected and promoted. (J3a) Satisfaction and happiness: Possibilities for present and future generations to find satisfaction and happiness in life should be maintained and promoted. (J4a) Ban on discrimination: No one shall be discriminated against on the basis of whatever external or internal characteristic. (J5a) Intercultural and interpersonal understanding: In recognition of the fact that the proper functioning and survival ability of society are substantially based upon the solidarity of its members, exchange and understanding between individuals and groups should be promoted. (J5b) Social and political participation: Social and political participation should be promoted. (J6b) Promoting peace and democracy: Peaceful coexistence of peoples and nations, respect for human rights and democracy should be promoted. (J7a) <i>Development of human capital: Collective knowledge and sociocultural heritage should be maintained and increased over the long term.</i> (J7b) Access to information and freedom of opinion: There should be no restriction to the flow of information. Free formation and expression of opinion must be guaranteed. (J7c) <i>Encouraging learning: The ability to absorb and process information should be promoted.</i> (J7d) Child-friendly environment: Children and young people in particular should be able to live in an open, motivating and future-oriented environment. (L6) Manitobans should acknowledge responsibility for sustaining the economy, the environment, human health and social well-being, with each being accountable for decisions and actions in a spirit of partnership and open cooperation. (L8) Manitobans should understand and respect differing economic and social views, values, traditions and aspirations. (M1) La protection de la santé et l'amélioration de la qualité de vie; (M5) la participation et l'engagement des citoyens et des groupes; (M6) l'accès au savoir; (M7) la délégation des pouvoirs et des responsabilités au niveau approprié d'autorité; (M8) le partenariat et la coopération intergouvernementale; (M11) la protection du patrimoine culturel. (N6) <i>Contribuer à améliorer l'autosuffisance des communautés;</i> (N8) Favoriser, à long terme, un équilibre démographique des régions permettant une occupation optimale du territoire, de façon à favoriser la qualité de la vie et des services à l'échelon des communautés.</p> <p>Synthesis : Foster social cohesion by limiting exclusion and by protecting basic rights and freedoms. Offer individuals and communities the opportunity to mobilize and increase their capabilities.</p>
<p>Soc.-Env. (24)</p>	<p>(A4) ensuring a sustainable level of population; (B6) Safe products and services; (B8) Information for the public; (C13) States shall develop national law regarding liability and compensation for the victims of pollution and other environmental damage. States shall also cooperate in an expeditious and more determined manner to develop further international law regarding liability and compensation for adverse effects of environmental damage caused by activities within their jurisdiction or control to areas beyond their jurisdiction. (C18) States shall immediately notify other States of any natural disasters or other emergencies that are likely to produce sudden harmful effects on the environment of those States. Every effort shall be made by the international community to help States so afflicted. (C19) States shall provide prior and timely notification and relevant information to potentially affected States on activities that may have a significant adverse transboundary environmental effect and shall consult with those States at an early stage and in good faith. (C10) Environmental issues are best handled with participation of all concerned citizens, at the relevant level. At the national level, each individual shall have appropriate access to information concerning the environment that is held by public authorities, including information on hazardous materials and activities in their communities, and the opportunity to participate in decision-making processes. States shall facilitate and encourage public awareness and participation by making information widely available. Effective access to judicial and administrative proceedings, including redress and remedy, shall be provided. (C26) States shall resolve all their environmental disputes peacefully and by appropriate means in accordance with the Charter of the United Nations. (C23) The environment and natural resources of people under oppression, domination and occupation shall be protected. (D3) Geographic equity or cross-border responsibility; (E4) Secure Earth's bounty and beauty for present and future generations. (E8) Advance the study of ecological sustainability and promote the open exchange and wide application of the knowledge acquired. (E12) <i>Uphold the right of all, without discrimination, to a natural and social environment supportive of human dignity, bodily health, and spiritual well-being, with special attention to the rights of indigenous peoples and minorities.</i> (F5) <i>Human right to resource access;</i> (F8) Care of organizations for environmental protection; (G16) Reaching international agreements for global issues; (G18) Law enforcement to protect our global commons should be applied when all other possibilities are exhausted. Sustain communities: (H9) Places. (J12c) Transparent business reporting for consumers: Within and outside</p>

	<p>manufacturing companies information should be made available that serves to ensure sustainable development and consumption, e.g. through environmental management systems. (J18b) Minimisation of ecological risks: Accident risks with wide-ranging impact upon humans and the biosphere are permissible only insofar as, even in the worst case scenario, they do not cause any permanent damage for a subsequent generation. (J19) Taking into consideration the time needed for natural processes: The rate of anthropogenic intervention in nature must be in balance with the tempo of the natural processes of relevance to the environment's capacity to respond and regenerate. (J20) <i>Acceptable natural and agricultural landscapes: Development of the natural habitat of humans must be guided by the concept of human rights. Human dignity requires a decent natural and agricultural landscape.</i> (L7) Manitobans share a common economic, physical and social environment. (L9) Manitobans should consider the aspirations, needs and views of the people of the various geographical regions and ethnic groups in Manitoba, including aboriginal peoples, to facilitate equitable management of Manitoba's common resources.</p> <p>Synthesis: Publicize information on the state of the environment to induce responsible behaviour. Guarantee access to ecosystems services essential to health and wellbeing.</p>
<p>Env.Econ.Soc. (23)</p>	<p>(A6) reorienting technology and managing risk; (C11) States shall enact effective environmental legislation. Environmental standards, management objectives and priorities should reflect the environmental and development context to which they apply. Standards applied by some countries may be inappropriate and of unwarranted economic and social cost to other countries, in particular developing countries. (C1) Human beings are at the centre of concerns for sustainable development. They are entitled to a healthy and productive life in harmony with nature; (C8) To achieve sustainable development and a higher quality of life for all people, States should reduce and eliminate unsustainable patterns of production and consumption and promote appropriate demographic policies. (C25) Peace, development and environmental protection are interdependent and indivisible. (D2) Equity between generations; (E7) Adopt patterns of production, consumption, and reproduction that safeguard Earth's regenerative capacities, human rights, and community well-being. (G5) Use of backcasting for envisioning a sustainable future; (G17) Account the full costs associated with international trade; (K3) Achieving a sustainable economy; (J3b) Development that takes well-being into account: Socioeconomic and environmental change must not be achieved at the cost of the physical and psychological well-being of the individual. (J10c) Promotion of research: Research and development activities which support sustainable development should be promoted. (J12b) Ecologically and socially acceptable consumption: Consumption of goods and services should be as environmentally compatible and socially just as possible. (J14a) Environmentally and socially acceptable world trade: The multilateral trading system should take account of the need for careful management of natural resources and promote technologies which ensure efficient use of environmental resources and social justice. (L1) Economic decisions should adequately reflect environmental, human health and social effects; (L2) Environmental and health initiatives should adequately take into account economic, human health and social consequences. (L3) The economy, the environment, human health and social well-being should be managed for the equal benefit of present and future generations. (L4) Manitobans are caretakers of the economy, the environment, human health and social well-being for the benefit of present and future generations. (L5) Today's decisions are to be balanced with tomorrow's effects. (L10) Manitobans should anticipate, and prevent or mitigate, significant adverse economic, environmental, human health and social effects of decisions and actions, having particular careful regard to decisions whose impacts are not entirely certain but which, on reasonable and well-informed grounds, appear to pose serious threats to the economy, the environment, human health and social well-being. (L16) Manitobans should think globally when acting locally, recognizing that there is economic, ecological and social interdependence among provinces and nations, and working cooperatively, within Canada and internationally, to integrate economic, environmental, human health and social factors in decision-making while developing comprehensive and equitable solutions to problems. (M2) l'équité intra et intergénérationnelle; (M14) rendre la production et la consommation plus responsables.</p> <p>Synthesis : Enforce the precautionary principle in face of potentially severe social of environmental harm (env). Seek stakeholder involvement, while respecting the accountability and subsidiarity principles (soc). Internalize external costs of goods and services with appropriate environmental and social policies (econ).</p>

ANNEXE B – PRINCIPES DE L'INGÉNIERIE DURABLE

B.1 Principes recensés dans la littérature

Référence	Principes
[A] International Federation of Consulting Engineers (FIDIC, 2000)	<p>Environmental dimension</p> <p>(1) Increase material efficiency by reducing the material demand of non-renewable good; (2) Reduce the material intensity via substitution technologies. (3) Enhance material recyclability. (4) Reduce and control the use and dispersion of toxic materials. (5) Reduce the energy required for transforming goods and supplying services. (6) Support the instruments of international conventions and agreements. (7) Maximise the sustainable use of biological and renewable resources. (8) Consider the impact of planned projects on air, soil, water, flora, and fauna.</p> <p>Economic dimension</p> <p>(9) Consider life-cycle costs. (10) Internalise external costs. (11) Consider alternative financing mechanisms. (12) Develop appropriate economic instruments to promote sustainable consumption. (13) Consider the economic impact on local structures.</p> <p>Social dimension</p> <p>(14) Enhance a participatory approach by involving stakeholders. (15) Promote public participation. (16) Promote the development of appropriate institutional frameworks. (17) Consider the influence on the existing social framework. (18) Assess the impact on health and the quality of life.</p>
[B] World Federation of Engineering Organizations (WFEO, 2004)	<p>(1) Engineers should create and apply technology to minimize the waste of resources, reduce pollution and protect the human health and well-being and the ecological environment, (2) The principles of honesty, equity, freedom from bribery, corruption and fraud, on which engineering codes are based, should be emphasized. High standards in all aspects of engineering practice should be maintained worldwide, (3) Engineers need to promote cooperation within the profession and also with natural and social scientists and the public in the creation and application of knowledge for sustainable development, (4) Engineers need to promote human and institutional capacity building. Curricular and pedagogical reform in engineering education and continuous professional development to encompass wider social and ethical concerns are needed, (5) Promoting the participation of women and addressing gender issues in engineering is crucial for the sustainability of the engineering community, (6) International cooperation in engineering facilitates the exchange of knowledge and promotes technological applications for health, wealth and well-being, poverty reduction and the culture of peace.</p>
[C] Institution of Civil Engineers (ICE, 2003) (United Kingdom)	<p>Sustainable engineering solutions: (1) Strike an informed balance in terms of costs, benefits, sustainability and acceptability; (2) Fit within the broader legislative framework; (3) Involve an assessment of whole life cycle costs.</p>
[D] Institute of Professional Engineers of New Zealand (2004)	<p>Maintaining the viability of the planet:</p> <p>(1) Humans need to maintain the integrity of global and local biophysical systems to ensure that the irreplaceable life support functions upon which human well-being depends are retained. (2) Non-renewable resource depletion rates shall equal the rate at which renewable substitutes are developed by human invention and investment. (3) Renewable resources must be managed to ensure that they can be produced over the long term within sustainable harvest rates (i.e. that do not exceed the regenerative capacity of the natural system that produces them), and without long term damage to the environment. (4) Technological options selected for engineered products, processes or systems, shall be weighted in favour of choices that, for a given expenditure, minimise the use of resources, particularly non-renewable resources such as fossil fuel-based energy and metals. They should also be based on the precautionary principle and reduce risks as much as practicable or foreseeable. (5) The material and energy intensity of engineered products, processes or systems needs to be reduced significantly (10 to 50 times), and the efficiency of those that use energy must be improved to achieve sustainability. To achieve this requires the use of recycling and other resource reuse and minimisation techniques. (6) All waste streams from the life cycle of engineered products, processes or systems shall be minimised, preferably at the source. Waste discharges should be kept within the assimilative capacity of the local and global environments. (7) The use and production of environmentally hazardous materials shall be</p>

	<p>minimised and, wherever possible, eliminated. In particular, the use of materials and chemicals that accumulate in the environment needs to be reduced to a level that does not exceed acceptable or natural levels.</p> <p>Providing for equity within and between generations: (8) Humans, now and in the future shall have equal rights to achieve an acceptable quality of life. They shall have choices in life that reduce significant gaps in health, security, social recognition, political influence, etc. between people. (9) Consumption of resources needs to be balanced between the affluent and those yet to fulfil their basic needs, while ensuring total resource use is within the environment's sustainable capacity. (10) Resource use and development must be considered over a sufficiently long time scale that future generations are not disadvantaged economically, socially or environmentally by present actions. (11) Those directly affected by engineering projects, products, processes or systems need to be consulted and given the opportunity to voice concerns without repercussions. Their views shall be incorporated into the planning and decision making process.</p> <p>Solving problems holistically: (12) Problem solutions shall be appropriate and based primarily on human needs and ecosystem viability rather than the availability of a particular technology. (13) Solutions to issues of growth in demand shall involve its realistic assessment and management, rather than merely predicting and providing the means for meeting growth targets. (14) A holistic, systems-based approach shall be used to solve problems rather than focussing on technology alone. (15) Methods shall be implemented that provide solutions with optimum outcomes for all stakeholders, rather than expedient or narrowly focussed solutions. (16) The use of unsustainable practices, or practices that present a risk to sustainability shall be minimised and reduced to zero over time. Where it is practicable or desirable, past degradation shall be reversed. (17) Problem solutions shall be based on prudent risk management approaches, and not by solving one problem at the expense of, or by creating another problem.</p>
[E] Instituto de la Ingenieria de Espana (IIE, 2005)	<p>(1) Global : intégration des préoccupations environnementales dans les activités et décisions économiques, comme élément d'équilibre pour prévenir et contrecarrer certains excès de la mondialisation. (2) Endogène: considération prioritaire des ressources propres de chaque communautés (naturelles, construites et humaines) présentes sur son territoire sans exclure les ressources exogènes. (3) Local et de bas en haut : débute avec les communautés locales, en incluant celles de caractère rural. (4) Intégré et systémique : se développe en un système (le système territorial) et, affecte, tout les secteurs économiques et territoriaux, procurant la réalisation de synergies positives. (5) Flexible : susceptible d'être renouvelé, une fois mis en marche, sans grandes perturbations économiques, sociales ou territoriales. (6) Participatif : prendre considération de l'opinion et de la sensibilité de la population affectée et compter sur leur acceptation. (7) Équilibré : en termes de rapports entres les sexes et de relations avec les populations indigènes et les groupes minoritaires. (8) Concertation : négociations entre les divers agents socio-économiques, de façon à ce que les responsabilités soient réparties équitablement. (9) Prospectif : imaginer des scénarios futurs et divers, qui ne se déduisent pas des tendances observables, mais plutôt du suppositions imaginaires. (10) Solidaire : dans le temps, avec les générations futures et dans l'espace, c'est-à-dire, pour toute la planète. (11) Progressif: s'établit en définissant des buts qui, une fois atteints, permettent d'en aborder d'autres plus ambitieux, selon le processus de la "spirale du progrès" qui va accroître la qualité de vie progressivement. (12) Planification : prévoir et réaliser de manière intelligente vers le future. (13) Technique : de telle forme que son application pratique puisse être formulée et exprimée en termes scientifiques, de différentes formes et avec différents modèles, en tenant compte de la connaissance limitée qu'on a des systèmes environnementaux.</p>
[F] The Royal Academy of Engineering (2005) (United Kingdom)	<p>(1) Look beyond your own locality and the immediate future. (2) Innovate and be creative. (3) Seek a balanced solution. (4) Seek engagement from all stakeholders. (5) Make sure you know the needs and wants. (6) Plan and manage effectively. (7) Give sustainability the benefit of any doubt. (8) If polluters must pollute... then they must pay as well. (9) Adopt a holistic, 'cradle-to-grave' approach. (10) Do things right, having decided on the right thing to do. (11) Beware cost reductions that masquerade as value engineering. (12) Practice what you preach.</p>
[G] Canadian Society for Civil Engineering (CSCE, 2006)	<p>(1) Including sustainability in values; (2) Protecting and enhancing environment; (3) Considering true life cycle costs; (4) Adopting green construction; (5) Keeping informed on environmental issues; (6) Meeting basic human needs; (7) Providing leadership on sustainable development; (8) Including other professionals and stakeholders; (9) Continuously improving existing projects.</p>
[H] Engineers	<p>(1) maintenir un niveau de connaissance raisonnable sur les questions portant sur le</p>

Canada (2006)	développement durable et sur l'environnement et ce autant pour les questions générales que celles liées à leur domaine d'exercice; (2) avoir recours à d'autres spécialistes pour les questions où les connaissances de l'ingénieur ne sont pas suffisantes; (3) faire preuve de jugement professionnel et responsable dans leurs considérations de l'environnement et du développement durable; (4) s'assurer que la planification et la gestion sont intégrées à leurs activités susceptibles d'avoir des effets néfastes; (5) inclure les coûts liés à la protection de l'environnement dans l'évaluation de leurs projets; (6) tenir compte de toute l'étude du cycle de vie; (7) encourager et solliciter la participation des intervenants; (8) se conformer et dépasser les exigences réglementaires ainsi que divulguer aux autorités compétentes toute information relative à la protection de la sécurité publique; (9) travailler activement à l'élaboration de meilleures pratiques.
[1] Loucks and Gladwell (1999)	(1) Design and manage systems to be effective, efficient and robust in all respects – balancing changes in demands and supplies over time and space. (2) Ensure that implementation, operation, maintenance and management of water resources projects are undertaken by those most knowledgeable of the needs of those for which the systems serve, and that they have opportunities to continually improve their skills and knowledge. (3) Ensure that human actions activities do not impair the long-term health and resilience of freshwater stocks and flows. (4) Ensure that systems are resilient to failure, i.e., all components of them can be replaced without undue disruption of services. (5) Ensure that management continuously monitors the performance of the systems and assesses and improves the total multi-criteria system performance, adapting to changing conditions and goals as appropriate. (6) Ensure that there are no negative long-term irreversible of cumulative adverse effects on the environment or on its ecosystems. (7) Evaluate and monitor the beneficial and adverse environmental effects and take actions to alleviate the adverse ones. (8) Ensure that systems interfere as little as possible with the natural environment and that any interferences are such that they can be absorbed by the environment without adverse consequences. (9) Protect and enhance the aesthetic environment. (10) Maintain interdependence and diversity of our natural ecosystems that form the very basis of our continued existence. (11) Acknowledge and respect the finite capacity of the environment to assimilate changes due to human activities. (12) Incorporate environmental objectives, conservation and energy efficiency into the design and operation of engineering facilities, to prevent or minimize any adverse environmental effects. (13) Take any action required to restore and sustain the natural environment and its ecosystems as needed in specific situations. (14) Make sure that any errors are made on the safe side with respect to environmental consequences, since the response of biological systems to human activities is frequently difficult to predict. (15) Fully consider all direct and indirect environmental costs over the full life cycles of the systems' projects. (16) Recover all costs of all resource development and management projects throughout their lifecycles in an equitable and efficient way. (17) Make sure that society supports and is willing to pay for the services provided by the water systems. (18) Distribute all system costs and benefits equitably within the user community. (19) Include costs and benefits related to environmental quality in economic evaluations of engineering activities. (20) Ensure that professionals and the public have a broad understanding of the political, economic, scientific and social issues that will impact their involvement and interaction with respect to water resource planning and management. (21) Implement institutional procedures to aid in reaching acceptable solutions to conflicts among stakeholders without unnecessary costs and litigation. (22) Ensure that responsible institutions have the capacity to plan, manage, monitor and adapt to changing situations. (23) Guarantee the rights of, and encourage, the community to be involved in project formulation, development and operations. (24) Recognize and maintain the worth of architectural, engineering, historic, cultural, archaeological and scientific sites and their existing structures and of the living systems within them. (25) Evaluate and consider the consequences of all plans, policies and actions – direct or indirect, immediate or long-term – upon social security, human health and equity. (26) Recognize that planning is multi-disciplinary by nature, and includes evaluation of all relevant options, including non-structural solutions and consideration of long-term effects of options (with preference being given to achieving long-term over short-term benefits) and incorporation of conservation objectives into design criteria. (27) Maintain options for future uses of resources. (28) Recognize individual limitations in assessing sustainability criteria and the need to involve all stakeholders in the planning and management of such systems so that projects can be made compatible with local living conditions and local environments. (29) Consider in the planning and the design stage the potential future changes in the use of the systems that might be needed to meet possible changing societal demands. (30) Promote and implement the development of alternatives to the use of non-renewable resources and the wise use of non-renewable resources through waste minimization and recycling. (31) Ensure that systems achieve their beneficial objectives with the lowest possible consumption of raw materials and energy, both during and

	after construction. (32) Include the quality of life objectives, both for current and future generations in all planning and decision-making processes, including the knowledge that flora and fauna not only have the right to exist, but are vital to the health and well-being of humans.
[J] Clift and Morris (2002)	Engineers should consider whether: (1) the most appropriate technology is being used; (2) the uncertainty of science is factored in; (3) waste and pollution are avoided while preserving resources; (4) whether social benefits and acceptance are maximized.
[K] Anastas and Zimmerman (2003)	(1) Inherent rather than circumstantial; (2) Prevention instead of treatment; (3) Design for separation; (4) Maximize efficiency; (5) Output-pulled versus input-pushed; (6) Conserve complexity; (7) Durability rather than immortality; (8) Meet need, minimize excess; (9) Minimize material diversity; (10) Integrate local material and energy; (11) Design for commercial afterlife; (12) Renewable rather than depleting
[L] Abraham (2006)	(1) Engineer processes and products holistically, use systems analysis, and integrate environmental impact assessment tools; (2) Conserve and improve natural ecosystems while protecting human health and well-being. (3) Use life cycle thinking in all engineering activities. (4) Ensure that all material and energy inputs and outputs are as inherently safe and benign as possible. (5) Minimize depletion of natural resources. (6) Strive to prevent waste. (7) Develop and apply engineering solutions, while being cognizant of local geography, aspirations and cultures. (8) Create engineering solutions beyond current or dominant technologies; improve, innovate and invent (technologies) to achieve sustainability. (9) Actively engage communities and stakeholders in development of engineering solutions.
[M] Fenner et al. (2006)	(1) Ethical foundation; (2) Future vision; (3) Interlinking scales; (4) Systems context; (5) Holistic financial accountability; (6) Maintenance of natural capital; (7) Efficient coordinated infrastructure; (8) Justice through participation.

B.2 Catégorisation et synthèse des principes

Dimension	Principles
Env. (20)	<p>(A6) Support the instruments of international conventions and agreements. (A8) Consider the impact of planned projects on air, soil, water, flora, and fauna. (D1) Humans need to maintain the integrity of global and local biophysical systems to ensure that the irreplaceable life support functions upon which human well-being depends are retained. (D6) All waste streams from the life cycle of engineered products, processes or systems shall be minimised, preferably at the source. Waste discharges should be kept within the assimilative capacity of the local and global environments. (D16) The use of unsustainable practices, or practices that present a risk to sustainability shall be minimised and reduced to zero over time. Where it is practicable or desirable, past degradation shall be reversed. (E13) <i>Technique : de telle forme que son application pratique puisse être formulée et exprimée en termes scientifiques, de différentes formes et avec différents modèles, en tenant compte de la connaissance limitée qu'on a des systèmes environnementaux.</i> (G2) Protecting and enhancing environment; (H4) s'assurer que la planification et la gestion sont intégrées à leurs activités susceptibles d'avoir des effets néfastes; (I6) <i>Ensure that there are no negative long-term irreversible of cumulative adverse effects on the environment or on its ecosystems.</i> (I7) Evaluate and monitor the beneficial and adverse environmental effects and take actions to alleviate the adverse ones. (I8) <i>Ensure that systems interfere as little as possible with the natural environment and that any interferences are such that they can be absorbed by the environment without adverse consequences.</i> (I10) Maintain interdependence and diversity of our natural ecosystems that form the very basis of our continued existence. (I11) <i>Acknowledge and respect the finite capacity of the environment to assimilate changes due to human activities.</i> (I13) Take any action required to restore and sustain the natural environment and its ecosystems as needed in specific situations. (I14) Make sure that any errors are made on the safe side with respect to environmental consequences, since the response of biological systems to human activities is frequently difficult to predict. (J2) the uncertainty of science is factored in; (K1) Inherent rather than circumstantial; (K7) Durability rather than immortality. (L1) <i>Engineer processes and products holistically, use systems analysis, and integrate environmental impact assessment tools;</i> (M6) Maintenance of natural capital.</p> <p>Synthesis: Preserve biodiversity considering the potential impacts of a project all over its life cycle. Keep the impacts of projects within the affected ecosystems' carrying capacity.</p>
Env.-Econ. (37)	<p>(A1) Increase material efficiency by reducing the material demand of non-renewable good; (A2) <i>Reduce the material intensity via substitution technologies.</i> (A3) Enhance material recyclability. (A4) Reduce and control the use and dispersion of toxic materials. (A5) <i>Reduce the energy required for transforming goods and supplying services.</i> (A7) Maximise the sustainable use of biological and renewable resources (A10) Internalise external costs. (D2) Non-renewable resource depletion rates shall equal the rate at which renewable substitutes are developed by human invention and investment. (D3) Renewable resources must be managed to ensure that they can be produced over the long term within sustainable harvest rates (i.e. that do not exceed the regenerative capacity of the natural system that produces them), and without long term damage to the environment. (D4) <i>Technological options selected for engineered products, processes or systems, shall be weighted in favour of choices that, for a given expenditure, minimise the use of resources, particularly non-renewable resources such as fossil fuel-based energy and metals. They should also be based on the precautionary principle and reduce risks as much as practicable or foreseeable.</i> (D5) <i>The material and energy intensity of engineered products, processes or systems needs to be reduced significantly (10 to 50 times), and the efficiency of those that use energy must be improved to achieve sustainability. To achieve this requires the use of recycling and other resource reuse and minimisation techniques.</i> (D7) The use and production of environmentally hazardous materials shall be minimised and, wherever possible, eliminated. In particular, the use of materials and chemicals that accumulate in the environment needs to be reduced to a level that does not exceed acceptable or natural levels. (F3) Seek a balanced solution. (F8) If polluters must pollute... then they must pay as well. (F9) Adopt a holistic, 'cradle-to-grave' approach. (G4) Adopting green construction; (H5) inclure les coûts liés à la protection de l'environnement dans l'évaluation de leurs projets; (H6) tenir compte de toute l'étude du cycle de vie; (I3) Ensure that human actions activities do not impair the long-term health and resilience of freshwater stocks and flows. (I12) <i>Incorporate environmental objectives, conservation and energy efficiency into the design and operation of engineering facilities, to prevent of minimize any adverse environmental effects.</i> (I15) Fully consider all direct and indirect environmental costs over the full life cycles of the systems' projects. (I19) Include costs and benefits related to environmental</p>

	<p>quality in economic evaluations of engineering activities. (I27) Maintain options for future uses of resources. (I30) Promote and implement the development of alternatives to the use of non-renewable resources and the wise use of non-renewable resources through waste minimization and recycling. (I31) <i>Ensure that systems achieve their beneficial objectives with the lowest possible consumption of raw materials and energy, both during and after construction. (J3) waste and pollution are avoided while preserving resources;</i> (K6) Conserve complexity; (K2) Prevention instead of treatment; (K8) <i>Meet need, minimize excess;</i> (K9) Minimize material diversity; (K10) Integrate local material and energy; (K12) Renewable rather than depleting. (K4) <i>Maximize efficiency;</i> (L5) Minimize depletion of natural resources. (L6) Strive to prevent waste. (M7) <i>Efficient coordinated infrastructure.</i></p> <p>Synthesis: Avoid the use of non-renewable resources and use renewable ones below their regeneration rate. Increase the material and energy efficiency of production and consumption activities.</p>
Econ. (12)	<p>(A9) <i>Consider life-cycle costs.</i> (A11) Consider alternative financing mechanisms. (A12) Develop appropriate economic instruments to promote sustainable consumption. (C3) <i>Involve an assessment of whole life cycle costs.</i> (D13) Solutions to issues of growth in demand shall involve its realistic assessment and management, rather than merely predicting and providing the means for meeting growth targets. (E4) <i>Intégré et systémique : se développe en un système (le système territorial) et, affecte, tout les secteurs économiques et territoriaux, procurant la réalisation de synergies positives.</i> (F2) Innovate and be creative. (F11) <i>Beware cost reductions that masquerade as value engineering.</i> (G3) <i>Considering true life cycle costs.</i> (I29) Consider in the planning and the design stage the potential future changes in the use of the systems that might be needed to meet possible changing societal demands. (L8) Create engineering solutions beyond current or dominant technologies; improve, innovate and invent (technologies) to achieve sustainability. (M5) <i>Holistic financial accountability.</i></p> <p>Synthesis: Support innovation to ensure continuous production of quality goods and services. Verify that the total benefits generated exceed total costs over the whole of a project's life cycle.</p>
Econ.-Soc. (10)	<p>(A13) Consider the economic impact on local structures. (B6) International cooperation in engineering facilitates the exchange of knowledge and promotes technological applications for health, wealth and well-being, poverty reduction and the culture of peace. (D15) Methods shall be implemented that provide solutions with optimum outcomes for all stakeholders, rather than expedient or narrowly focussed solutions. (E8) <i>Concertation : négociations entre les divers agents socio-économiques, de façon à ce que les responsabilités soient réparties équitablement.</i> (E10) <i>Solidaire : dans le temps, avec les générations futures et dans l'espace, c'est-à-dire, pour toute la planète.</i> (G6) Meeting basic human needs; (I16) Recover all costs of all resource development and management projects throughout their lifecycles in an equitable and efficient way. (I17) Make sure that society supports and is willing to pay for the services provided by the water systems. (I18) Distribute all system costs and benefits equitably within the user community. (J4) whether social benefits and acceptance are maximized.</p> <p>Synthesis: Distribute the benefits and costs resulting from a project in a fair manner. Consider the impact of projects on the labor market and improve the quality of jobs.</p>
Soc. (24)	<p>(A14) Enhance a participatory approach by involving stakeholders. (A15) Promote public participation. (A16) <i>Promote the development of appropriate institutional frameworks.</i> (A17) Consider the influence on the existing social framework. (B2) The principles of honesty, equity, freedom from bribery, corruption and fraud, on which engineering codes are based, should be emphasized. High standards in all aspects of engineering practice should be maintained worldwide, (B4) <i>Engineers need to promote human and institutional capacity building. Curricular and pedagogical reform in engineering education and continuous professional development to encompass wider social and ethical concerns are needed;</i> (B5) Promoting the participation of women and addressing gender issues in engineering is crucial for the sustainability of the engineering community, (C2) Fit within the broader legislative framework; (D8) Humans, now and in the future shall have equal rights to achieve an acceptable quality of life. They shall have choices in life that reduce significant gaps in health, security, social recognition, political influence, etc. between people. (D11) Those directly affected by engineering projects, products, processes or systems need to be consulted and given the opportunity to voice concerns without repercussions. Their views shall be incorporated into the planning and decision making process. (E3) <i>Local et de bas en haut : débute avec les communautés locales, en incluant celles de caractère rural.</i> (E6) <i>Participatif : prendre considération de l'opinion et de la sensibilité de la</i></p>

	<p>population affectée et compter sur leur acceptation. (E7) Équilibré : en termes de rapports entre les sexes et de relations avec les populations indigènes et les groupes minoritaires. (E11) Progressif: s'établit en définissant des buts qui, une fois atteints, permettent d'en aborder d'autres plus ambitieux, selon le processus de la "spirale du progrès" qui va accroître la qualité de vie progressivement. (F4) Seek engagement from all stakeholders. (F5) Make sure you know the needs and wants. (H7) encourager et solliciter la participation des intervenants; (I2) <i>Ensure that implementation, operation, maintenance and management of water resources projects are undertaken by those most knowledgeable of the needs of those for which the systems serve, and that they have opportunities to continually improve their skills and knowledge.</i> (I21) Implement institutional procedures to aid in reaching acceptable solutions to conflicts among stakeholders without unnecessary costs and litigation. (I22) Ensure that responsible institutions have the capacity to plan, manage, monitor and adapt to changing situations. (I23) Guarantee the rights of, and encourage, the community to be involved in project formulation, development and operations. (I25) Evaluate and consider the consequences of all plans, policies and actions – direct or indirect, immediate or long-term – upon social security, human health and equity. (L9) Actively engage communities and stakeholders in development of engineering solutions. (M8) Justice through participation.</p> <p>Synthesis: Help people discriminate needs from longings so they can truly increase their wellbeing. Ensure that projects contribute towards development of involved people and communities.</p>
<p>Soc.-Env. (13)</p>	<p>(A18) Assess the impact on health and the quality of life. (B1) Engineers should create and apply technology to minimize the waste of resources, reduce pollution and protect the human health and well-being and the ecological environment, (D12) Problem solutions shall be appropriate and based primarily on human needs and ecosystem viability rather than the availability of a particular technology. (G5) Keeping informed on environmental issues; (H8) se conformer et dépasser les exigences réglementaires ainsi que divulguer aux autorités compétentes toute information relative à la protection de la sécurité publique; (I9) <i>Protect and enhance the aesthetic environment.</i> (I28) Recognize individual limitations in assessing sustainability criteria and the need to involve all stakeholders in the planning and management of such systems so that projects can be made compatible with local living conditions and local environments. (I24) Recognize and maintain the worth of architectural, engineering, historic, cultural, archaeological and scientific sites and their existing structures and of the living systems within them. (I32) Include the quality of life objectives, both for current and future generations in all planning and decision-making processes, including the knowledge that flora and fauna not only have the right to exist, but are vital to the health and well-being of humans. (L2) <i>Conserve and improve natural ecosystems while protecting human health and well-being.</i> (L4) <i>Ensure that all material and energy inputs and outputs are as inherently safe and benign as possible.</i> (L7) Develop and apply engineering solutions, while being cognizant of local geography, aspirations and cultures. (M3) Interlinking scales.</p> <p>Synthesis: Spread information on the impacts of projects to increase awareness and responsibility. Contribute towards a safe and healthy environment along all phases of a project's life cycle.</p>
<p>Env.Econ.S oc. (14)</p>	<p>(B3) Engineers need to promote cooperation within the profession and also with natural and social scientists and the public in the creation and application of knowledge for sustainable development, (C1) Strike an informed balance in terms of costs, benefits, sustainability and acceptability; (D9) Consumption of resources needs to be balanced between the affluent and those yet to fulfil their basic needs, while ensuring total resource use is within the environment's sustainable capacity. (D10) Resource use and development must be considered over a sufficiently long time scale that future generations are not disadvantaged economically, socially or environmentally by present actions. (D14) <i>A holistic, systems-based approach shall be used to solve problems rather than focussing on technology alone.</i> (D17) Problem solutions shall be based on prudent risk management approaches, and not by solving one problem at the expense of, or by creating another problem. (E1) Global : intégration des préoccupations environnementales dans les activités et décisions économiques, comme élément d'équilibre pour prévenir et contrecarrer certains excès de la mondialisation. (E5) Flexible : susceptible d'être renouvelé, une fois mis en marche, sans grandes perturbations économiques, sociales ou territoriales. (F7) Give sustainability the benefit of any doubt. (G8) <i>Including other professionals and stakeholders;</i> (H2) <i>avoir recours à d'autres spécialistes pour les questions où les connaissances de l'ingénieur ne sont pas suffisantes.</i> (I1) Design and manage systems to be effective, efficient and robust in all respects – balancing changes in demands and supplies over time and space. (I20) <i>Ensure that professionals and the public have a broad understanding of the political, economic, scientific and social issues that will impact their involvement and interaction with respect to water</i></p>

	<p><i>resource planning and management. (M4) Systems context.</i></p> <p>Synthesis: Enforce the precautionary principle when a project may cause severe social or environmental harm (env). <i>Seek involvement from stakeholders and other professionals to find holistic solutions (soc).</i> <u>Identify, evaluate and internalize externalities when the context makes it possible (econ).</u></p>
<p>Eng. (22)</p>	<p>(E9) Prospectif : imaginer des scénarios futurs et divers, qui ne se déduisent pas des tendances observables, mais plutôt de suppositions imaginaires. (E12) Planification : prévoir et réaliser de manière intelligente vers le future. (F1) Look beyond your own locality and the immediate future. (F6) Plan and manage effectively. (F10) Do things right, having decided on the right thing to do. (F12) Practice what you preach. (G1) Including sustainability in values; (G7) Providing leadership on sustainable development; (G9) Continuously improving existing projects. (H1) maintenir un niveau de connaissance raisonnable sur les questions portant sur le développement durable et sur l'environnement et ce autant pour les questions générales que celles liées à leur domaine d'exercice; (H3) faire preuve de jugement professionnel et responsable dans leurs considérations de l'environnement et du développement durable; (H9) travailler activement à l'élaboration de meilleures pratiques. (I4) Ensure that systems are resilient to failure, i.e., all components of them can be replaced without undue disruption of services. (I5) Ensure that management continuously monitors the performance of the systems and assesses and improves the total multi-criteria system performance, adapting to changing conditions and goals as appropriate. (I26) Recognize that planning is multi-disciplinary by nature, and includes evaluation of all relevant options, including non-structural solutions and consideration of long-term effects of options (with preference being given to achieving long-term over short-term benefits) and incorporation of conservation objectives into design criteria. (J1) the most appropriate technology is being used; (K5) Output-pulled versus input-pushed; (K3) Design for separation; (K11) Design for commercial afterlife; (L3) Use life cycle thinking in all engineering activities. (M1) Ethical foundation; (M2) Future vision</p>

ANNEXE C – CRITÈRES ET INDICATEURS POUR LES SMAEU

C.1 Listes de critères et d'indicateurs recensées

Référence	Systèmes visés	Finalité	Cadre, principes ou enjeux	Priorisation	Volets traités	Nombre	Aide à la décision	Outils
[X] Agudelo et coll. [2007]	Collecte et traitement (5 opt.)	Évaluation	Non	Non spécifié	Technique et D.D.	Critères (7) Indicateurs (22)		Analyse du risque qualitatif (1-3) Suivi technique. ACV. Mesures physiques. Estimation des coûts. Jugement expert semi-quantitatif (1-3)
[A] Ashley et coll. [2004] Fait référence à Foxon et coll. [2002]	4 études de cas A.I : collecte A.II : eaux pluviales A.III : collecte et épuration A.IV : épuration	Conception	Non	Sélection parmi les critères génériques A.I Pondération par membres de l'organisation responsable A.IV Aucune	Technique et D.D.	Critères : Primaires (9-15) Secondaires (14-24) Indicateurs (16-39)	A.I ELECTRE, PROMETHE, SMART A.IV Coûts	A.I : Sondage, Jugement expert semi-quantitatif, ACV, estimation des coûts A.IV : estimation des coûts
[Y] Bagley et coll. [2005]	Eau potable, eaux usées, eaux pluviales		Non	Non spécifié	D.D.	Critères (4)		Non spécifié
[B] Balkema et coll. [2001] Balkema et coll. [2002]	n.a.	Évaluation	Cadre	Sélection parmi les critères génériques Pondération par les parties prenantes	Technique et D.D.	Critères (18) Indicateurs (38)		Non spécifié
[C] Bodo et coll. [2006]	Dépollution (traitement) (5 opt.)	Évaluation	Non	Pondération par une équipe non précisée et inclusion si la pondération dépasse un seuil	Technique et D.D.	Critères : Tech. (7) Env. (5) Soc.-Écon. (5)	Classement selon somme pondérée Complété par une analyse de la valeur	Analyse selon jugement expert semi-quantitatif (0-10)

[D] Bradley et coll. [2002]	Traitement sur le site (2 opt.)	Évaluation	Non	Pondération par l'équipe de conception	D.D. avec technique implicite	Critères : Sociaux (6) Écon. (5) Env. (7)	Somme pondérée	Analyse selon jugement expert semi-quantitatif (0-5)
[E] Burkhard et coll. [2000]	Traitement des eaux pluviales (9 opt.) Traitement des eaux usées (11 opt.) Réutilisation des eaux usées (4 opt.)	Évaluation	Non	n.a.	Technique et D.D.	Critères : Techniques (3) Écon. (3) Sociaux (7)	n.a.	Analyse qualitative basée sur des données secondaires
[F] Diaper et Sharma [2007]	Collecte et traitement (9 opt.)	Conception	Non, documents officiels	Révision des critères après rencontre avec les parties prenantes Pondération par les parties prenantes	Technique et D.D.	Évaluation préliminaire : Critères (6) Évaluation détaillée : Critères (17) Indicateurs (17-23)	Évaluation préliminaire : Somme pondérée Évaluation détaillée : PROMETHEE	Évaluation préliminaire : Analyse semi-quantitative par un groupe de travail (1-5) Évaluation détaillée : Analyse quantitative complétée par jugement expert ou communautaire semi-quantitatif (1-5)
[G] Fane [2007] Adaptation de quelques critères de Balkema et coll. [2002]	Traitement des eaux usées (membranes)	Évaluation	Non	n.a.	Technique et D.D.	Critères (4) Indicateurs (15)	n.a.	Analyse qualitative
[H] Ganoulis et coll. [2003]	Traitement (4 opt.) Gestion des boues (2 opt.)	Évaluation	Non	Non spécifié	D.D.	Critères (9)	ELECTRE-3 ELECTRE-4 Compromise programming	Analyse quantitative ou semi-quantitative (non spécifié)

[I] Gaulke et coll. [2010]	Collecte (2 opt.) Traitement (3 opt.)	Conception	Non, parties prenantes	Identification des critères prioritaires à l'aide des parties prenantes et des points faibles du système actuel	Technique et D.D.	Critères (10)	Élimination des options qui ne rencontrent pas un ou plusieurs critères	Analyse selon jugement expert semi-quantitatif (0, 1 ou 2)
[J] Grönlund et coll. [2004]	Traitement (3 opt.)	Évaluation	Principes	n.a.	D.D.	Critère (1) complété par principes (4)	n.a.	Analyse quantitative de l'énergie complétée par une analyse qualitative des principes
[K] Hellstrom et Jonsson [2006]	Traitement sur le site (7 opt.)	Évaluation	Non	n.a.	Technique et D.D.	Critères (7) Indicateurs (10)	n.a.	Analyse quantitative complétée par une discussion qualitative.
[L] Hoffmann et coll. [2000]	Collecte et traitement (3 opt.)	Conception	Non, parties prenantes	Sélection basée sur les discussions avec les parties prenantes Pondération selon 4 profils, d'après les discussions avec les parties prenantes	Technique et D.D.	Critères (7)	Classement selon somme pondérée pour les 4 profils	ACV pour le critère environnement complété par une analyse selon jugement expert semi-quantitatif (-5 à 5)
[M] Keremane et McKay [2007]	Réutilisation des eaux usées traitées (1 opt.)	Évaluation	Non, capital (env., econ., soc.)	n.a.	D.D.	Critères (12)	n.a.	Analyse qualitative basée sur les perceptions des parties prenantes (entrevues, sondages, etc.) et des observations sur le terrain

[N] Makropoulos et coll. [2007] Référence à Ashley et coll. [2004] (critères) Référence à Balkema et coll. [2002] (modèle)	Cycle de l'eau (production d'eau potable, traitement des eaux usées, gestion des eaux pluviales) (3 opt.)	Évaluation ou conception (préliminaire)	Non	n.a.	Technique et D.D.	Critères (18) et indicateurs (22)	Diagramme radar	Modélisation technique (paramètres physiques et économiques). Jugement semi-quantitatif (0 à 5) par les experts ou les parties prenantes.
[O] Martin et coll. [2007]	Gestion des eaux pluviales (BMPs) (8 opt.)	Évaluation	Non	Pondération hypothétique selon 3 approches stratégiques	Technique et D.D.	Paramètres primaires (9) Paramètres secondaires (12) Critères (16)	ELECTRE-III	Analyse quantitative des coûts. Complété par jugement expert semi-quantitatif basé sur données (littérature et sondage auprès des utilisateurs)
[P] McConville et Mihelcic [2007]	Eau potable et eaux usées (1 opt.)	Évaluation	Non	Pondération implicite, tous les critères ont la même valeur, trois critères sociaux, un économique et un environnemental	D.D.	Critères (5) Groupes de questions (100)	Diagramme radar	Jugement semi-quantitatif (0 à 5) basé sur des grilles de question
[Q] Mosley [2006]	Collecte Eaux pluviales Épuration		Non, cadre LEED	Pondération des crédits	D.D.	Critères (24)	Somme des points Points attribués selon conditions rencontrée ou seuils atteints	Analyse qualitative (respect des conditions) ou quantitative (respect de seuils)

[R] Muga et Mihelcic [2008]	Traitement (3 opt.)	Évaluation	Caractéristiques souhaitables pour des indicateurs de D.D.	n.a.	D.D. (technique implicite)	Indicateurs (15)	Diagramme radar	Analyse quantitative basée sur des données dans la littérature
[S] Murray et coll. [2009]	Traitement (1 opt.)	Évaluation (contexte et projet)	Caractéristiques souhaitables pour des indicateurs de D.D.	n.a.	D.D. (technique implicite)	Indicateurs (26)	Calculs de ratio (burden to capacity)	Analyse quantitative (technique, statistiques, littérature)
[T] Palme et coll. [2005] Fait référence à Lundin [2003]	Gestion des boues d'épuration (4 opt.) Opération du système	Évaluation Suivi	Non	Les indicateurs pour le suivi se basent sur les discussions tenues lors de l'évaluation des options Pondération par les parties prenantes	Technique et D.D.	Évaluation : Critères (9) Suivi : Critères (7) Indicateurs (12)	Évaluation : Somme pondérée Suivi : Respect des cibles	Évaluation : Jugement expert semi-quantitatif (1 à 5) des parties prenantes basé en partie sur des analyses quantitatives Suivi : Analyse quantitative.
[U] Raval et Donnelly [2002]	Collecte et traitement (4 opt.)	Conception	Objectifs généraux (principes)	AHP (non appliquée)	Technique et D.D.	Critères (4) Sous-critères (17)	AHP (non appliquée)	Techniques appropriées (non appliquées)
[V] Singhirunnusorn et Strenstrom [2009]	Collecte et traitement		Conceptualisation et opérationnalisation ?	Sélection des principes, critères et indicateurs selon l'évaluation d'experts Critères non appliqués	Technique et D.D.	Principes (7) Critères (14) Indicateurs (61)	n.a.	Non spécifié
[W] Sundberg et coll. [2004]	Gestion des eaux pluviales		Approche systémique	n.a.	D.D. (technique implicite)	Indicateurs (29)	n.a.	Non spécifié

C.2 Catégorisation des critères et des indicateurs

Dimension	Criteria	Indicator
Technical	Performance [A, B, C, D, E, F, G, K, M, N, O, Q, R, S, U, V, W]	<p>Compliance with consent (BOD, SS, P, N, FC) [A] Removal of pollutants (BOD, SS, P, N, FC) [B, E, G, K, O, R, V] (microorganisms) [G] Influent concentration of pathogens / Ability of treatment scheme to remove endemic pathogens [S] Impact on watercourse quality [Q] (BOD, SS, P, N) [A, D, F, W] (heavy metals) [B] (salts) [F] (persistent organic pollutants and heavy metals) [W] (peak toxicity over 1 year) [W] Amount of pathogens discharged [W] Effluent nutrient concentration / Nutrient standard for receiving water or user [S] Effluent BOD concentration / BOD standard for receiving water or user [S] Impact on groundwater quality [O, Q, V] (BOD, SS, P, N) [D, F] (salts) [F] Impact on aquatic ecosystems [D, O, Q] Impact on marine environment [M] Daily average sludge production / Daily sludge wasting [S] Amounts of stormwater to the urban water system [W] Percentage of unpolluted stormwater released [W]</p>
	Service provision [A, I, N, S, U]	<p>Wastewater treated [A] Domestic WW produced / Domestic WW conveyed to TP [S] Growth rate in water usage / Growth rate in WW treatment [S] Current WW flow to facility / Design capacity of facility [S]</p>
	Reliability [A, B, F, G, K, N, O, T, U, V, X, W]	<p>Risk of flooding (basements) from sewers [A, W] Amount of flooding in urban areas [W] Risk of failure to meet consent conditions due to malfunction [A, O, V] Leakage and overflows [F] Hydraulic overload in WWTP, number of days/year [W] Accessibility to market for sewage byproducts [T] Possibility that the plant will operate properly over its life expectancy [V] Possibility that the effluent will consistently meet the requirements [V] Number of shutdowns due to hardware or process malfunction [V] Number of unplanned events due to mechanical failures [V] Possibility that mechanical failures will cause violations of effluent quality [V] Unscheduled maintenance [W] System breakdown due to failures (h/pe.y) [X] System breakdown due to user abuse (shock load) (h/pe.y) [X] Operation & Maintenance (h/pe.y) [X]</p>
	Durability [A, B, N, U, V, W]	<p>Number of years in operation [A] Life expectancy [V] Renewal rate / Degradation rate [W]</p>

	Robustness [I, V, W, X]	<p>Ability to accommodate daily and seasonal fluctuations [I]</p> <p>Ability to respond to variations (high flow rate, shock BOD loading, low BOD loading, toxic contamination) [V]</p> <p>Number of process upsets due to the variation of the influent [V]</p> <p>Level of influence of process upsets on effluent quality [V]</p> <p>Influence of weather on system performance [V]</p> <p>Ability to manage irregular precipitation [W]</p> <p>Amounts of source separated stormwater [W]</p> <p>Ratio impervious area / total area [W]</p> <p>Sensitivity to climate [X]</p> <p>Sensitivity to socio-economic conditions [X]</p> <p>Sensitivity to ecosystem conditions [X]</p> <p>Sensitivity to geological conditions [X]</p> <p>Sensitivity to other utilities [X]</p>
	Flexibility / Adaptability [A, B, C, D, F, G, L, N, U, V, W]	<p>Potential and ability to accommodate future changes [A]</p> <p>Cost of removing from or adding to system [A, D]</p> <p>Allow future growth [F]</p> <p>Allow combination with other infrastructure [F]</p> <p>Possibility to upgrade or extend the plant operation [V]</p> <p>Limitation factors for the system upgrade or extension [V]</p> <p>Sensitivity to changed population density [W]</p> <p>Ratio of separated sewers / combined sewers [W]</p> <p>Contribution to future flexible development [W]</p>
	Ease of use [G, I, K, L]	
	Operation [L, M, Q, S]	<p>Operation and maintenance needs and frequency [M]</p> <p>Develop and use a start-up and O&M plan [Q]</p> <p>Measure or validate the performance of the system [Q]</p> <p>Person hours per day skilled operator present at facility / Number of days in previous year facility shutdown [S]</p>
	Small-scale systems [G]	
	Innovation [Q]	Exception performance [Q]
	Simplicity / Complexity [V]	<p>Overall complexity of plant construction [V]</p> <p>Overall complexity of system installation [V]</p> <p>Difficulty to start the system [V]</p> <p>Time needed for plant construction [V]</p> <p>Time needed for system installation [V]</p> <p>Time needed for system start-up [V]</p> <p>Complexity of O&M [V]</p> <p>Skill and personnel requirement [V]</p> <p>Time requirement for training [V]</p> <p>Special operating and maintenance requirements [V]</p> <p>Special manufactured or imported equipment and spare parts [V]</p>

Environnemental	Resource use [A, B, C, D, E, F, G, I, J, K, M, N, P, Q, R, T, S, U, V, W, X]	Non-renewable resource depletion [P] Natural resource destruction [P] Energy use [A, B, D, F, G, N, Q, R, T, W, X] Electricity used to treat WW / Empirical energy value of WW [S] Facility electricity use per person eq. / Average local per capita electricity use [S] Renewable energy use [Q, T] Chemical use [A, G, N, X] Materials [F] Water use [B, F, M, N, X] Water reclamation and re-use [Q, V, W] Possibility of reuse for non-contact irrigation [V] Possibility of reuse for non-food crops [V] Possibility of reuse for food crops [V] WW treated / WW reused [S] Agricultural land within 3km radius / Amount of treated WW used for agricultural irrigation [S] Resource re-use [I] Water re-use [F] Possibility of groundwater recharge [V] Contribution to ground water recharge [W] Recovery of nutriments [A, B, F, K, V, X] Possibility of recycling of organic matter [V] Recycling of P [T] Recycling of N [T] Local demand for nutrients / Unutilized nutrient content in WW and sludge [S] Recovery of energy [F, T] Possibility of recovery of byproduct (biogas) [V] Sludge re-use [A, B] Land use [A, B, D, E, G, J, N] Total area of facility [V] Plant footprint [V] Buffer zone around facility [V] Water conservation [C] Impact on water quantity [D, F, Q] Impact on groundwater quantity [D, F, Q] Changes in groundwater levels [W] Emergy use [J] Exergy use [K, W] Resource extraction rate / resource accumulated extraction [J] Use of free resources / use of human made unevenly distributed resources [J] Reuse of existing structural elements [Q] Recycling of construction waste [Q] Environmental water shortage / Surface water withdrawal [S]
-----------------	---	---

	Environmental impact [A, B, D, H, I, J, L, M, N, O, Q, T, S, U, W, X]	<p>Impact on land [Q, (heavy metals in sludge) [A, B] (BOD, SS, N, P, FC in sludge [B] (productivity, permeability) [D, M] (BOD, SS, N, P, salts in reused water on soil [F, M] (heavy metals and organic compounds [T, W])</p> <p>Average metal concentration in sludge / Metal standard for sludge land application [S]</p> <p>Sludge disposed at landfill / Daily tipping capacity of landfill [S]</p> <p>Impact on air (CO₂, SO₂, NO_x,...) [A, B,, (odors, biosols, toxic compounds [D, Q]</p> <p>Net GW impact caused by WWT process / Available GW impact offset via energy capture [S]</p> <p>Acidification associated with WWT / Eutrophication avoided by WWT [S]</p> <p>Eutrophication [X]</p> <p>Impact on biological diversity (species at risk) [A, (biological indices) [O]</p> <p>Ecotoxicity [X,</p> <p>Change of flows in natural waters [W]</p> <p>Impact on terrestrial ecosystems [D, Q]</p> <p>Impact on plants [H]</p> <p>Land area used for WWT facility / Habitat created by WWT facility [S]</p> <p>Regional impact [I]</p> <p>Increasing concentrations of anthropogenic substances in the environment [J]</p> <p>Use of ecotoxic chemicals [Q]</p>
	Environmental benefit [E, W]	Contribution to biodiversity [W]
	Local impact [I, Q, V]	<p>Erosion and sedimentation control (collection system) [Q]</p> <p>Route selection to avoid sensitive areas (collection system) [Q]</p> <p>Reduced disturbance by conserving natural areas [Q]</p> <p>Landscape or visual impact [V]</p>
	Urban development [Q]	<p>Constructing collection system in high-density areas [Q]</p> <p>Provide collection system for brownfield redevelopment [Q]</p>
	Favorable land conditions [V]	<p>Impact of groundwater level on system operation [V]</p> <p>Impact of soil type on system operation [V]</p> <p>Flooding risk [V]</p>
Social	Impact on risks to human health [A, D, F, H, K, L, M, N, Q, U, W, X]	<p>Risk of infection [A]</p> <p>Hygiene (removal of indicator organisms) [K]</p> <p>Exposure to toxic compounds [A]</p> <p>Number of incidents [D]</p> <p>Risk of contamination of sources of drinking water [X]</p> <p>Risk of skin contact with (black water or brown water) [X]</p> <p>Risk of skin contact with (grey water, rain water, or yellow water) [X]</p> <p>Risk of accidental ingestion on swimming waters where treated wastewater is discharged [X]</p>
	Security [L, Q, W]	<p>Use of toxic chemicals [Q]</p> <p>Risk of accidents [W]</p>
	Working conditions [T]	<p>Satisfaction [T]</p> <p>Stress [T]</p> <p>Influence [T]</p>

	Acceptability / Acceptance [A, B, E, F, G, N, T, U, V]	Perceived impact on the environment [A] Perceived impact on health [A] Perceived impact on property value [A] Acceptance of end uses of treated wastewater [F] Acceptance of use of byproducts from sewage [T] General acceptability [A] Public acceptability of system operation [V] Public support for wastewater fee collection [V]
	Aesthetics and amenity value [A, C, D, E, F, H, I, K, O, R, V, W, X]	Perceived impact on aesthetics and amenity value [A, D, E, F, O] Measured level of nuisance factors (odours, noise, traffic) [D, K] (odours) [F, R] (odours, noise, breeding insects and other parasites, aerosol production, traffic) [V] (odor, bugs and other nuisances) [W] Nuisance [X] Recreation [H] Fishing [H] Swimming [H] Open space availability [R]
	Participation [A, B, D, E, N, P, R, U, V]	Number of people participating in initiative [A, D] Community decision-making [D, P] Level of outreach to identify and involve stakeholders [D] Public participation in system O&M [V]
	Responsibility [U] / Stimulation of sustainable behaviour [A, B, E, N]	Number of people willing to change behaviour [A]
	Awareness [A, E, N, T, U]	Awareness of implications of behaviour [A] (contaminants in WW) [T] Information made available to stakeholders [A]
	Provide education [I]	Provide information on environmental benefits [I]
	Level of education [R]	Operational requirements [R]
	Social inclusion [A, N, O, W]	Population with access to information [A] Generation of social contacts [W]
	Institutional requirements [B, E, G]	Flexibility in management structures [W]
	Require ongoing commitment [I]	Commitment by organisation responsible (education, human resources, support, training, monitoring, maintenance) [I]
	Household requirements [F]	Maintenance requirements [F] Space per household (m ³ /pe) [F] Area per household (m ² /pe) [F]
	Community development [D, E]	Equitable distribution of costs and benefits [D] Educational opportunity [D]
	Social equity [U]	
	Expertise [B, G]	
	Understanding of local tradition and core values [P]	

	Preserve cultural traditions, ways of life and physical heritage [D]	
	Provide for the needs of indigenous population [I]	
	Promote societal virtues such as the public trust [D]	Level of education on the value of the infrastructure [D]
	Social capital [M]	
	Community cohesion [M]	
	Multifunctional use [O]	
	Sustainable urban living [O]	Contribution to urban sustainable policies [O]
	Political cohesion [P]	Alignment with countries priorities [P] Coordination of efforts (local, national, international) [P]
Économic	Life cycle costs [A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, N, O, R, S, T, U, V, W, X]	Capital costs [A, E, H, K, N, O, R, U, V, W] Land costs [H, O, V] Subsidy from government [V] Operational costs [A, E, H, K, N, R, U, V] Maintenance costs [A, E, K, O, R, U, V] Personnel cost [V] Energy cost [V] Administration cost [V] Cost to upgrade beyond advanced wastewater treatment [U] Decommissioning costs [A] Total cost [T, X] Cost of stormwater system / Cost of total system [W] Annual investment in maintenance / Replacement value of WWT infrastructure [S] Sludge handling cost / Total cost of wastewater handling [S] Estimated damage of 10-year flood [W] Estimated damage of 100-year flood [W]
	Contribution to community economic development [B, C, D, L, M, S]	Benefits from byproducts [B, D] Diversity in valorisation options [C, D] Protection of recreational resources [D] Cost of nutrient treatment and removal / Local retail value of influent nutrient for productive use [S] Local value of resources embodied in water / Value of wastewater being captured [S] Local value of resources embodied in sludge / Value of sludge being captured [S]
	Willingness to pay [A, N]	WTP for environmental benefits [A] WTP for health [A] WTP to prevent odours [A]
	Affordability [A, B, D, G, I, N, R, S, U, W]	% of budget for households [A, D] User fee [D, R] % of rates in neighbouring communities [D] User fee / Average household income [S] Cost per household [U] / Cost per capita [W]

	Accessibility / Costs for the community [O]	Stormwater fees [O] Adoption and liability coverage [O]
	Community capacity [D, P, V, S]	Availability of local resources [P] Capacity to finance capital [D] Capacity to operate and maintain [D] Capacity to repair and replace [D] General capacity [P] O&M costs / User fee collection [S] Source of revenue for O&M [V]
	Cost effectiveness [B, I]	
	Labour intensity [B, R, W]	Staffing required to operate plant [R] Work hours for O&M [W]
	Job opportunities [M,]	

ANNEXE D – QUESTIONNAIRES POUR L'ÉVALUATION DU SMAEU EXISTANT

D.1 Questionnaire technique soumis aux experts

1. Mise en contexte du projet de recherche

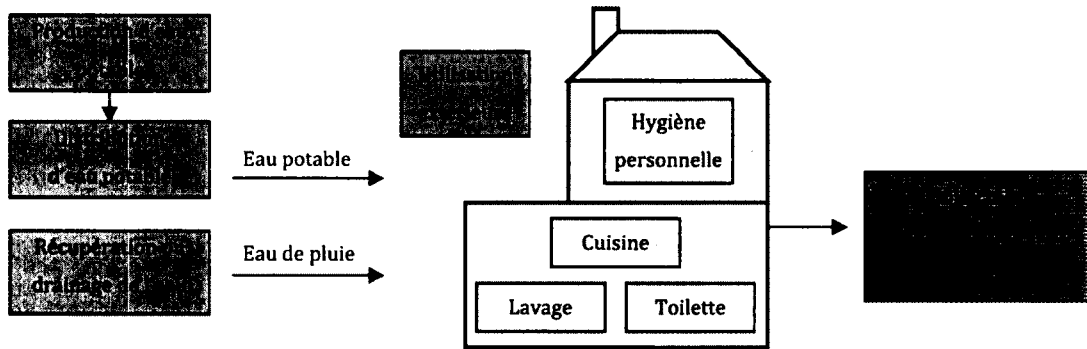
Ce sondage est réalisé dans le cadre d'un projet de recherche qui porte sur l'intégration des principes de développement durable à la pratique de l'ingénierie. La conception des systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées est étudiée de façon plus précise et le système de Deauville est utilisé à titre d'exemple.

2. Objectifs du sondage et méthodologie employée

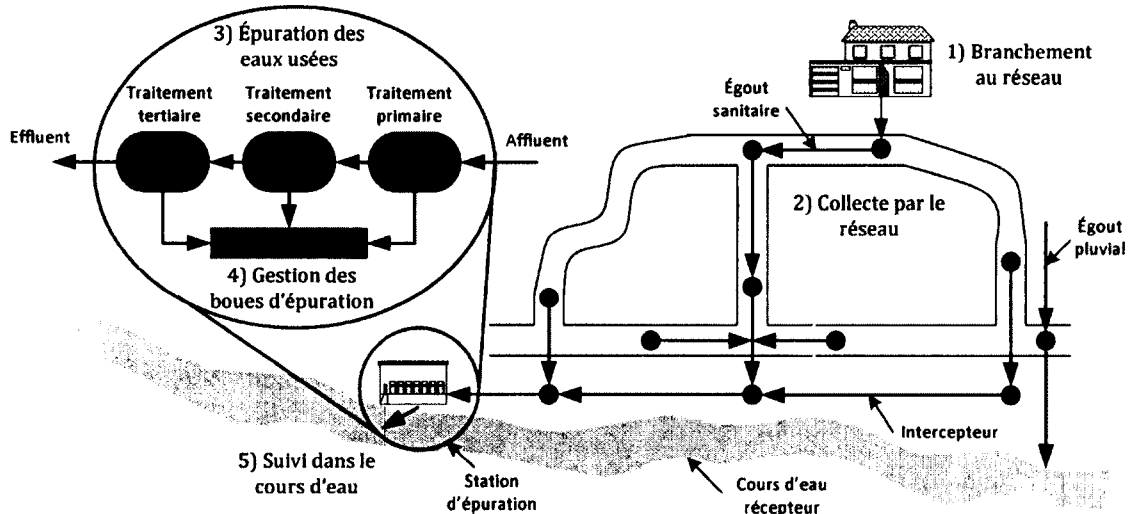
L'objectif de ce sondage est d'évaluer l'ensemble du système d'assainissement de Deauville dans sa configuration actuelle selon différents critères techniques. La méthodologie utilisée s'inspire de l'analyse de perception catégorielle. La perception du système visé est évaluée à l'aide d'un questionnaire simple, puis les consensus ou les divergences d'opinion sont identifiés.

3. Un bref survol de l'assainissement des eaux usées

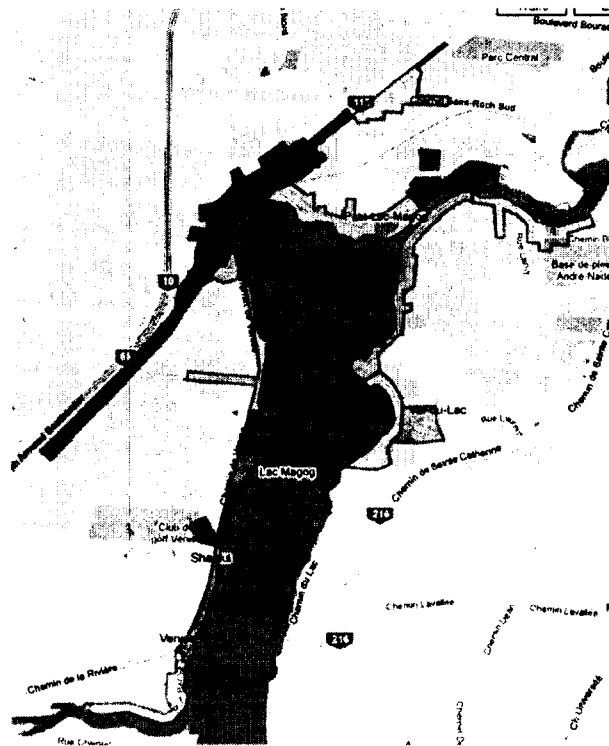
La consommation d'eau potable et la production d'eaux usées domestiques :



4. Le système d'assainissement des eaux usées de Deauville :



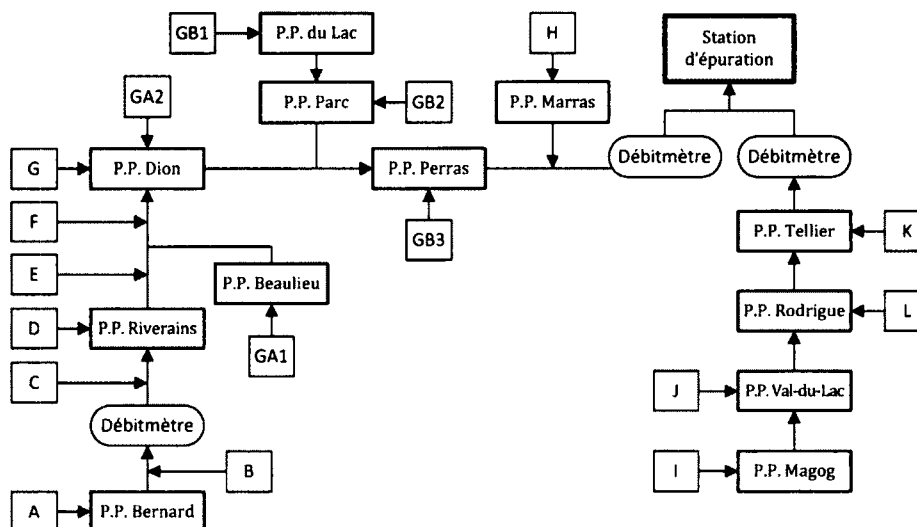
5. Le territoire desservi par le système de Deauville



Le système d'assainissement des eaux usées de Deauville dessert principalement des résidents situés en bordure du Lac Magog et de la rivière Magog. Au moment de sa complétion, en 1990, le système desservait trois municipalités : Deauville, Rock Forest et le Canton de Magog.

Depuis 2002, Deauville et Rock Forest font partie de la Ville de Sherbrooke et le Canton de Magog fait partie de la Ville de Magog. Dépendamment des secteurs, le réseau est gravitaire, à basse pression ou sous vide. Les étangs aérés sont situés à Deauville, au bout de la rue Marras, près de l'avenue du Parc. Depuis 2006, la Ville de Sherbrooke opère sa partie du système, ceci était auparavant donné sous contrat à Aquatech.

6. La configuration du réseau de collecte des eaux usées



Il survient parfois des débordements au poste de pompage Dion lors de fortes pluies ou lors de la fonte des neiges. Il est fort probable que plusieurs résidences aient leurs gouttières ainsi que leurs drains de fondation raccordés au réseau sanitaire.

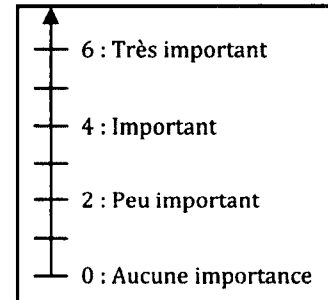
Le système comprend environ 200 postes de pompage à basse pression qui desservent chacun deux résidences dans la plupart de cas.

7. Directives générales

- L'évaluation porte sur l'ensemble du système d'assainissement de Deauville (branchements privés, réseau de collecte des eaux usées, ouvrages de surverse, station d'épuration et rejet de l'effluent traité en rivière) dans sa configuration actuelle;
- Les réponses seront traitées de façon confidentielle et les résultats seront présentés de façon agrégée. Les données recueillies seront uniquement utilisées à des fins de recherche;
- Votre réponse doit refléter le plus fidèlement possible votre perception. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse.

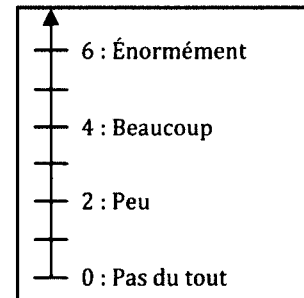
A. Pondération de l'importance

Il faut premièrement évaluer l'importance de chacun des critères selon l'échelle de pondération proposée. Par exemple, si vous croyez qu'il est d'une importance primordiale qu'un réseau soit facile à opérer et à entretenir, vous attribuez la valeur 6 à l'importance du critère « Facilité d'opération et d'entretien »





B. Votre perception du système



Ensuite, le système d'assainissement de Deauville dans son ensemble et dans sa configuration actuelle doit être évalué selon l'échelle de perception proposée pour chacun des critères. Par exemple, si vous croyez que le réseau n'est pas du tout fiable ou robuste, vous attribuez la valeur 0 au critère « Fiabilité et robustesse »;







- Après avoir exprimé de façon quantitative votre perception du système d'assainissement de Deauville, nous discuterons brièvement de votre évaluation pour chacun des critères.





8. Questions

T1- Conditions de travail	Importance	Votre perception
Est-ce que vous estimez que les conditions de travail des employés affectés au système (opération et entretien de la station, entretien du réseau, etc.) sont sécuritaires ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>

T2- Fiabilité et robustesse	Importance	Votre perception
T2A- Est-ce que vous croyez que le réseau est apte à fonctionner sans défaillances lors de conditions d'opération normales et d'événements extrêmes ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>
T2B- Est-ce que vous croyez que la station est apte à fonctionner sans défaillances lors de conditions d'opération normales et d'événements extrêmes ?		

T3- Facilité de construction	Importance	Votre perception
T3A- Est-ce que vous estimez que le réseau, dans sa configuration actuelle, a été simple à construire ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>
T3B- Est-ce que vous estimez que la station, dans sa configuration actuelle, a été simple à construire ?		

T4- Facilité d'opération et d'entretien	Importance	Votre perception
T4A- Est-ce que vous estimez que le système, dans sa configuration actuelle, est simple à opérer et à entretenir ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>
T4B- Est-ce que vous estimez que le système, dans sa configuration actuelle, est simple à opérer et à entretenir ?		

T5- Flexibilité et adaptabilité	Importance	Votre perception
T5A- Est-ce que vous croyez que le réseau peut facilement accommoder des changements d'utilisation et peut facilement être modifié ?	 6 : Très important 4 : Important	 6 : Énormément 4 : Beaucoup
T5B- Est-ce que vous croyez que la station peut facilement accommoder des changements d'utilisation et peut facilement être modifié ?	 2 : Peu important 0 : Aucune importance	 2 : Peu 0 : Pas du tout

D.2 Questionnaire social soumis aux parties prenantes

1. Mise en contexte du projet de recherche

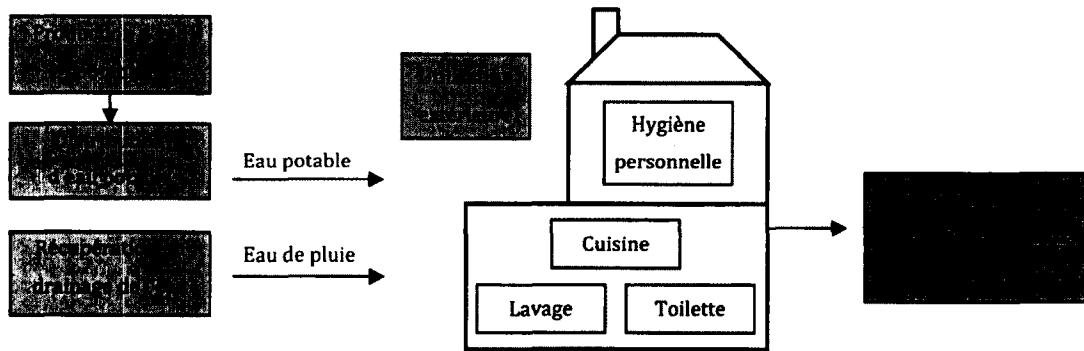
Ce sondage est réalisé dans le cadre d'un projet de recherche qui porte sur l'intégration des principes de développement durable à la pratique de l'ingénierie. La conception des systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées est étudiée de façon plus précise et le système de Deauville est utilisé à titre d'exemple.

2. Objectifs du sondage et méthodologie employée

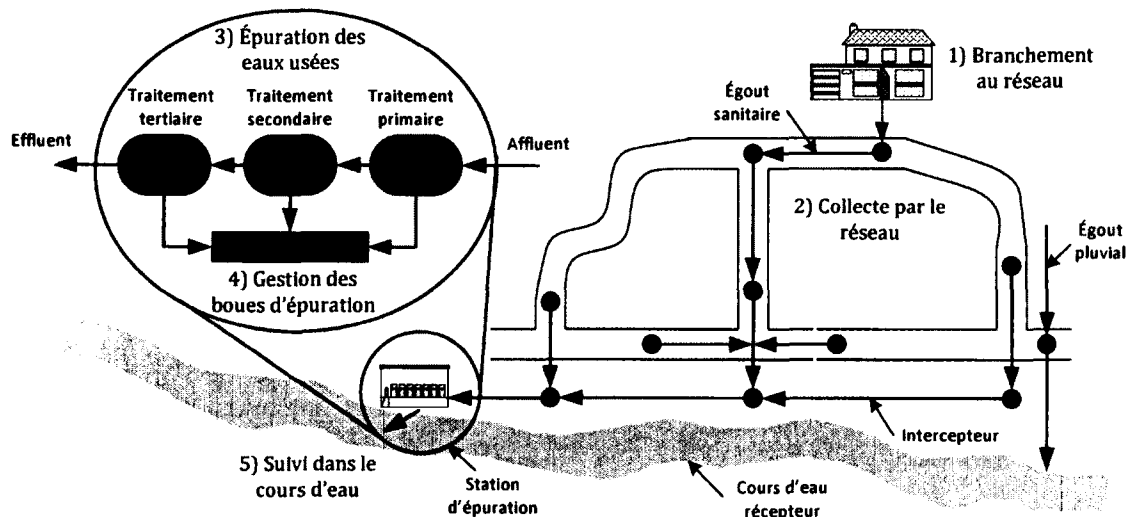
L'objectif de ce sondage est d'évaluer l'ensemble du système d'assainissement de Deauville dans sa configuration actuelle selon différents critères sociaux. La méthodologie utilisée s'inspire de l'analyse de perception catégorielle. La perception du système visé est évaluée à l'aide d'un questionnaire simple, puis les consensus ou les divergences d'opinion sont identifiés.

3. Un bref survol de l'assainissement des eaux usées

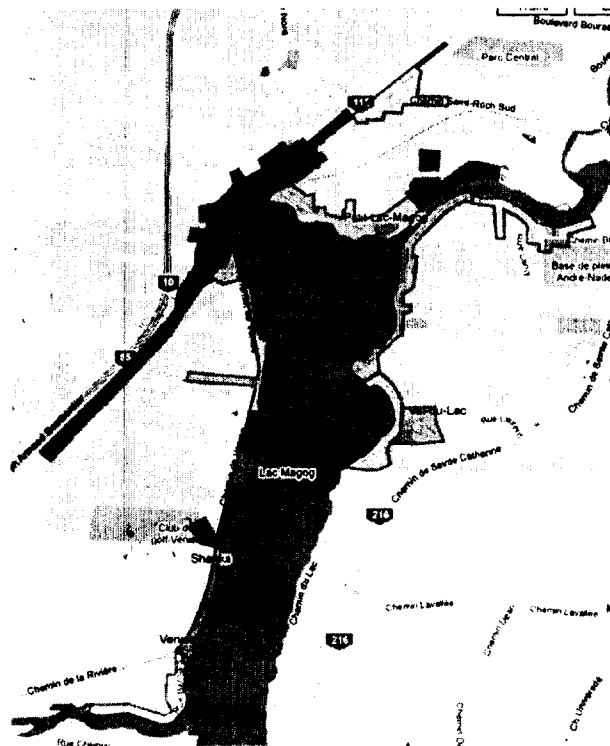
La consommation d'eau potable et la production d'eaux usées domestiques :



4. Le système d'assainissement des eaux usées de Deauville :



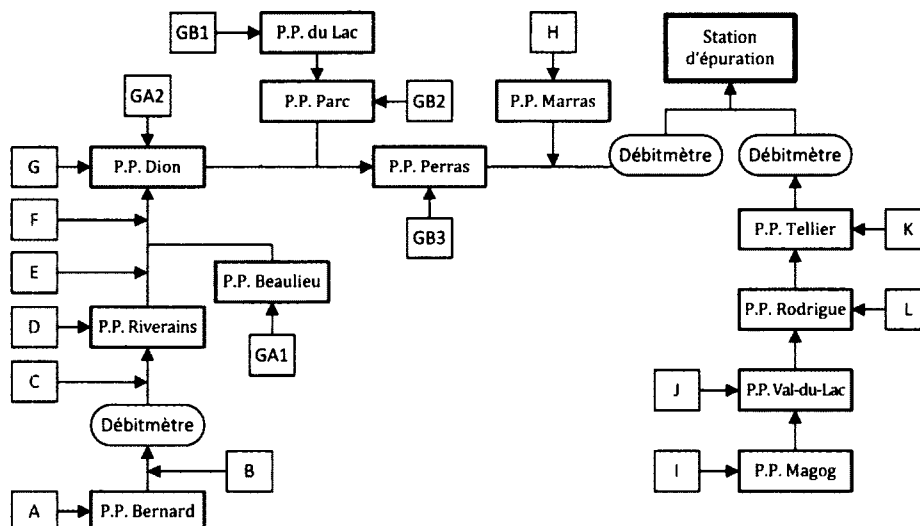
5. Le territoire desservi par le système de Deauville



Le système d'assainissement des eaux usées de Deauville dessert principalement des résidents situés en bordure du Lac Magog et de la rivière Magog. Au moment de sa complétion, en 1990, le système desservait trois municipalités : Deauville, Rock Forest et le Canton de Magog.

Depuis 2002, Deauville et Rock Forest font partie de la Ville de Sherbrooke et le Canton de Magog fait partie de la Ville de Magog. Dépendamment des secteurs, le réseau est gravitaire, à basse pression ou sous vide. Les étangs aérés sont situés à Deauville, au bout de la rue Marras, près de l'avenue du Parc. Depuis 2006, la Ville de Sherbrooke opère sa partie du système, ceci était auparavant donné sous contrat à Aquatech.

6. La configuration du réseau de collecte des eaux usées



Il survient parfois des débordements au poste de pompage Dion lors de fortes pluies ou lors de la fonte des neiges. Il est fort probable que plusieurs résidences aient leurs gouttières ainsi que leurs drains de fondation raccordés au réseau sanitaire.

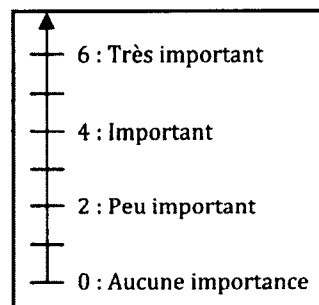
Le système comprend environ 200 postes de pompage à basse pression qui desservent chacun deux résidences dans la plupart de cas.

7. Directives générales

- L'évaluation porte sur l'ensemble du système d'assainissement de Deauville (branchements privés, réseau de collecte des eaux usées, ouvrages de surverse, station d'épuration et rejet de l'effluent traité en rivière) dans sa configuration actuelle;
- Les réponses seront traitées de façon confidentielle et les résultats seront présentés de façon agrégée. Les données recueillies seront uniquement utilisées à des fins de recherche;
- Votre réponse doit refléter le plus fidèlement possible votre perception. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse.

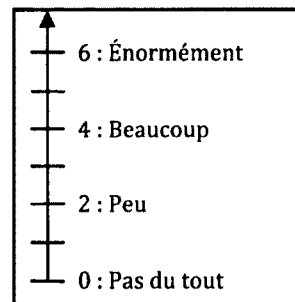
A. Pondération de l'importance

Il faut premièrement évaluer l'importance de chacun des critères selon l'échelle de pondération proposée. Par exemple, si vous croyez qu'il est d'une importance primordiale qu'un réseau soit facile à opérer et à entretenir, vous attribuez la valeur 6 à l'importance du critère « Facilité d'opération et d'entretien »





B. Votre perception du système



Ensuite, le système d'assainissement de Deauville dans son ensemble et dans sa configuration actuelle doit être évalué selon l'échelle de perception proposée pour chacun des critères. Par exemple, si vous croyez que le réseau n'est pas du tout fiable ou robuste, vous attribuez la valeur 0 au critère « Fiabilité et robustesse »;







- Après avoir exprimé de façon quantitative votre perception du système d'assainissement de Deauville, nous discuterons brièvement de votre évaluation pour chacun des critères.

8. Questions

S1- Sensibilisation et connaissances	Importance	Votre perception
Est-ce que vous pensez que les citoyens desservis par le système comprennent, de façon générale, son fonctionnement et sont sensibilisés à son utilité ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>

S2- Comportements responsables	Importance	Votre perception
Est-ce que vous pensez que les citoyens desservis ont, de façon générale, des comportements compatibles avec le bon fonctionnement du système ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>

S3- Capacité organisationnelle	Importance	Votre perception
Est-ce que vous estimez que l'organisation responsable de l'opération du système (la Ville de Sherbrooke) a les ressources (financière, humaines, etc.) nécessaires pour opérer le système et gérer les problèmes pouvant survenir ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>

S4- Nuisances	Importance	Votre perception
Est-ce que vous pensez que le système est à l'origine de nuisances (odeurs, refoulements, etc.) pour les citoyens desservis ? T4B- Est-ce que vous estimez que le système, dans sa configuration actuelle, est simple à opérer et à entretenir ?	 <p>6 : Très important 4 : Important 2 : Peu important 0 : Aucune importance</p>	 <p>6 : Énormément 4 : Beaucoup 2 : Peu 0 : Pas du tout</p>

T5- Flexibilité et adaptabilité	Importance	Votre perception
<p>T5A- Est-ce que vous croyez que le réseau peut facilement accommoder des changements d'utilisation et peut facilement être modifié ?</p> <p>T5B- Est-ce que vous croyez que la station peut facilement accommoder des changements d'utilisation et peut facilement être modifié ?</p>	<p>6 : Très important</p> <p>4 : Important</p> <p>2 : Peu important</p> <p>0 : Aucune importance</p>	<p>6 : Énormément</p> <p>4 : Beaucoup</p> <p>2 : Peu</p> <p>0 : Pas du tout</p>

S6- Acceptabilité	Importance	Votre perception
<p>Est-ce que vous croyez que les technologies utilisées en ce moment ainsi que la manière dont celles-ci sont utilisées sont acceptables.</p>	<p>6 : Très important</p> <p>4 : Important</p> <p>2 : Peu important</p> <p>0 : Aucune importance</p>	<p>6 : Énormément</p> <p>4 : Beaucoup</p> <p>2 : Peu</p> <p>0 : Pas du tout</p>

ANNEXE E – QUESTIONNAIRES POUR L'ÉVALUATION DES CONTINGENCES

1. Déroulement de l'entrevue (DE)

DE-N1	<p>L'entrevue dure environ 30 minutes et comporte huit principales sections :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Présentation des objectifs de l'enquête 2. Mise en contexte de l'enquête 3. Question sur vos activités près des plans d'eau 4. Questions sur la modernisation du système d'assainissement des eaux usées 5. Questions sur vos comportements et attitudes envers l'environnement 6. Évaluation de la valeur accordée à l'environnement 7. Questions sur les priorités du ménage 8. Questions sur les caractéristiques du ménage
-------	--

2. Lettre d'information (LI)

FC-N1	Présentation de la lettre d'information et explication du contenu.
-------	--

3. Objectifs de l'enquête (OB)

OB-N1	<p>Tel que mentionné dans la lettre d'information, nos principaux objectifs sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • D'estimer la valeur accordée par les citoyens à l'environnement préservé par les systèmes d'assainissement des eaux usées. • De mieux connaître la perception qu'ont les citoyens de divers enjeux relatifs à la qualité de l'eau et à la gestion des eaux usées.
-------	---

4. Mise en contexte (MC)

MC-N1	Présentation de la carte 1 (support visuel) situant géographiquement le système d'assainissement des eaux usées.
MC-N2	Description du schéma 1 (support visuel) présentant les utilisations domestiques de l'eau.
MC-N3	Description du schéma 2 (support visuel) présentant le système d'assainissement.
MC-N4	<p>Description des fonctions du système :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La collecte des eaux usées évite les contacts entre les eaux usées et les citoyens et élimine ainsi les risques pour la santé humaine. La collecte permet aussi de ne pas exposer la faune et la flore aux eaux usées et leur évite les mêmes risques. • L'épuration des eaux usées permet de préserver la qualité de l'eau dans la rivière Magog et le lac Magog. Ceci protège, entre autres, les sources d'eau potable, les espèces vivantes consommées par les humains, les autres organismes aquatiques et terrestres, les activités récréatives et les aspects esthétiques. <p>Notons que les cours d'eau peuvent être affectés par d'autres sources de pollution, par exemple les rejets industriels ou le ruissellement agricole.</p>
MC-N5	<p>Divers intervenants sont impliqués dans la gestion du système d'assainissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La Ville de Sherbrooke est responsable de l'opération de la portion du système qui se trouve sur son territoire, tout comme la Ville de Magog. • Le gouvernement du Québec, par l'intermédiaire du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs ainsi que du ministère des Affaires municipales et des Régions, fixe les exigences de rejet, réalise le suivi du système et vérifie que les exigences sont respectées.

5. Usage des plans d'eau (UP)

UP-N1	La première série de questions porte les activités des membres de votre ménage autour du lac Magog ou de la rivière Magog.
UP-N2	À quelle fréquence les membres de votre ménage pratiquent-ils les activités suivantes (lorsque la température le permet) ?
	Très souvent : 3 fois par semaine ou plus (5) Rarement : 2 à 4 fois par année (2) Souvent : 1 à 2 fois par semaine (4) Jamais (1) Occasionnellement : 1 à 2 fois par mois (3)
UP-Q1	Activités de plage ou baignade
UP-Q2	Canotage, kayak ou voile
UP-Q3	Pêche sportive
UP-Q4	Ski nautique, wakeboard ou autres sports similaires
UP-Q5	Marche, course ou bicyclette
UP-Q6	Autres sports ou loisirs

6. Acceptabilité des modifications au système (AM)

AM-N1	Les prochaines questions portent sur des avenues envisageables pour la modernisation du système d'assainissement des eaux usées. Nous vous rappelons que les données ne sont pas amassées pour la ville de Sherbrooke, la ville de Magog ou le gouvernement du Québec. Indiquez si vous êtes favorables ou non aux interventions décrites.
	Très favorable (1) Très défavorable (4) Relativement favorable (2) Ma préférence peut varier en fonction du Relativement défavorable (3) type d'intervention, d'équipement ou de travaux (5)
AM-Q1	Installation de nouveaux équipements à la station d'épuration pour assurer le respect des exigences gouvernementales (faibles frais supplémentaires: 0 à 2\$ par mois).
AM-Q2	Comme question précédente, mais avec des frais supplémentaires plus élevés : 15 à 20\$/mois
AM-Q3	Réfection des d'égouts ou des postes de pompage pour assurer le respect des exigences gouvernementales (faibles frais supplémentaires: 0 à 2\$ par mois).
AM-Q4	Comme question précédente, mais avec des frais supplémentaires plus élevés : 15 à 20\$/mois
AM-Q5	Installation de compteurs d'eau et tarification en fonction de la consommation d'eau.
AM-Q6	Valorisation des boues provenant de l'épuration des eaux usées pour des applications normées par le gouvernement du Québec.
AM-N2	Certaines actions posées par les citoyens peuvent aussi avoir un effet bénéfique sur le fonctionnement du système d'assainissement. Indiquez si vous prévoyez réaliser à court terme ou moyen terme (d'ici un an) les actions suivantes :
	Assurément ou déjà réalisé (1) Non (4) Probablement (2) Ne s'applique pas (5) Probablement pas (3)
AM-Q7	Installation d'un déflecteur aux gouttières (10\$ à 15\$) : schéma 3 (support visuel).
AM-Q8	Installation d'un baril pour l'eau de pluie (100\$ à 200\$) : schéma 3 (support visuel).
AM-Q9	Installation d'un puits percolant (250\$ à 1000\$) : schéma 3 (support visuel).
AM-Q10	Installation de robinets et pommes de douche à faible débit ou installation de réducteurs de débit sur les robinets et pommes de douche existants (10\$ à 30\$).
AM-Q11	Installation de toilettes à faible débit ou modifications de toilettes existantes.

AM-Q12	Installation de toilettes à double chasse (250\$ à 350\$).
AM-Q13	Installation de toilettes permettant la séparation de l'urine et modification de la tuyauterie (coûts de 1000\$ à 2000\$) dans le cas où leur installation est entièrement subventionnée.
AM-Q14	Installation de toilettes permettant la séparation de l'urine et modification de la tuyauterie (coûts de 1000\$ à 2000\$) dans le cas où leur installation est aux frais du ménage.
AM-Q15	Installation d'équipement pour capter et réutiliser l'eau de pluie dans la résidence pour les toilettes, la laveuse, le lave-vaisselle et l'usage extérieur (4000\$ à 10 000\$).

7. Comportements et attitudes envers l'environnement

CA-N1	La prochaine série de questions porte sur les comportements et attitudes du ménage envers l'environnement. Pensez à tous les membres du ménage en répondant.
CA-Q1	Quelle proportion des appareils électroménagers (laveuse, lave-vaisselle, etc.) et équipements (douches, toilette, etc.) du ménage ont une faible consommation d'eau. Tous (1), la plupart (2), peu (3), aucun (4), ne sais pas (5).
CA-Q2	Quelle proportion des appareils électroménagers (frigorifère, poêle, etc.) et des appareils électroniques (téléviseurs, ordinateurs, etc.) de votre ménage ont une faible consommation énergétique ? Tous (1), la plupart (2), peu (3), aucun (4), ne sais pas (5).
CA-Q3	Est-ce que les membres du ménage ont des habitudes favorisant une faible consommation d'eau ? Toujours (1), souvent (2), occasionnellement (3), jamais (4), ne sais pas (5).
CA-Q4	Est-ce que les membres du ménage ont des habitudes favorisant l'économie d'énergie ? Toujours (1), souvent (2), occasionnellement (3), jamais (4), ne sais pas (5).
CA-Q5	Est-ce que les membres du ménage utilisent des moyens de transport qui ont peu d'impact sur l'environnement (marche, bicyclette, transport en commun, etc.) ? Toujours (1), souvent (2), occasionnellement (3), jamais (4), ne sais pas (5).
CA-Q6	Est-ce que les membres du ménage recyclent et/ou compostent les matières résiduelles ? Toujours (1), souvent (2), occasionnellement (3), jamais (4), ne sais pas (5).
CA-Q7	Est-ce que les membres du ménage consomment des produits « écologiques » ou « verts » (produits de nettoyage, papier hygiénique, etc.) Toujours (1), souvent (2), occasionnellement (3), jamais (4), ne sais pas (5).
CA-Q8	Est-ce que les membres du ménage consomment des aliments biologiques ? Toujours (1), souvent (2), occasionnellement (3), jamais (4), ne sais pas (5).
CA-Q9	Est-ce que les membres du ménage sont intéressés par les enjeux environnementaux actuels (changements climatiques, pollution atmosphérique, qualité des cours d'eau), Très intéressés (1), relativement intéressés (2), peu intéressés (3), aucunement intéressés (4).

8. Évaluation des contingences (EC)

EC-N1	Les prochaines questions font appel à des mises en situation hypothétiques. Elles permettent d'évaluer la valeur que vous accordez à la qualité de votre environnement. Nous vous rappelons que ces données ne sont pas amassées pour la ville de Sherbrooke, la ville de Magog ou le gouvernement du Québec.
-------	---

	<p>Pour que l'étude soit valide, il est important que vous répondiez le plus honnêtement possible quant aux montants qui pourraient vous être versés ou pourraient vous être exigés dans les situations décrites. La bonne réponse est celle qui reflète réellement votre volonté de payer ou à accepter une compensation (support visuel). Comme les montants seraient versés ou demandés aux ménages, vos réponses doivent respecter les contraintes du ménage.</p>
EC-Q1	<p>Quel est votre niveau de satisfaction par rapport à la collecte des eaux usées (le transport des eaux usées hors de votre résidence jusqu'à la station d'épuration) ?</p> <p>Très satisfait (4), relativement satisfait (3), relativement insatisfait (2), très insatisfait (1).</p>
EC-Q2	<p>Quelle est la ou les raisons de votre insatisfaction ?</p> <p>Refoulements d'eaux usées dans votre sous-sol (1) Odeurs près des regards ou des postes de pompage (2) Débordements aux postes de pompage (3) Autres raisons (4)</p>
EC-Q4	<p>Supposons que des mesures correctives étaient proposées par la Ville pour corriger les problèmes soulevés. Choisissez parmi les montants suivants lesquels vous seriez prêts à payer sur une base mensuelle pour l'implantation de ces mesures. Ce montant s'ajouterait au montant actuellement perçu par la Ville pour la gestion des eaux usées (15\$/mois à Sherbrooke; 13\$/mois à Magog). Exemple A.</p>
EC-Q5	<p>Supposons que la collecte des eaux usées soit interrompue pendant une période indéfinie pour des raisons hors du contrôle de la Ville. Pour les résidences ayant un accès à un cours d'eau, les eaux usées seraient rejetées sur le terrain et s'écouleraient vers le cours d'eau à proximité des résidences. Pour les résidences n'ayant pas un accès à un cours d'eau, les eaux usées seraient rejetées dans les fossés ou sur le bord de la route. Il en résulterait des risques accrus pour la santé humaine, la faune et la flore, une dégradation esthétique ainsi que des odeurs.</p> <p>Les correctifs ne pourraient être apportés immédiatement. Nous faisons donc l'hypothèse qu'un montant vous soit offert pour compenser la dégradation de votre environnement immédiat en attendant les correctifs. Choisissez parmi les montants suivants lesquels vous jugeriez acceptable comme dédommagement dans une telle situation. Exemple B.</p>
EC-Q6	<p>Quel est votre niveau de satisfaction par rapport à la qualité de l'eau dans la rivière Magog et le lac Magog ?</p> <p>Très satisfait (4), relativement satisfait (3), relativement insatisfait (2), très insatisfait (1).</p>
EC-Q7	<p>Quelle est la ou les raisons de votre insatisfaction ?</p> <p>Contamination empêchant ou limitant la baignade ou d'autres sports nautiques (1) Contamination empêchant ou limitant la pêche (2) Apparence générale de l'eau (3) Prolifération de cyanobactéries ou algues bleu-vert (4) Autres (5).</p>
EC-Q9	<p>Supposons que des mesures correctives étaient proposées pour corriger les problèmes soulevés. Ces mesures pourraient toucher toutes les sources de pollution (eaux usées municipales, eaux pluviales, résidences isolées, terres agricoles, industries, etc.). Choisissez parmi les montants suivants lesquels vous seriez prêts à payer sur une base mensuelle pour l'implantation de ces mesures. Ce montant s'ajouterait aux diverses taxes et impôts que vous payez déjà. Exemple A.</p>

EC-Q10	<p>Supposons que l'épuration des eaux usées soit interrompue pendant une période indéfinie dans toutes les municipalités situées dans le bassin versant de la rivière Magog pour des raisons hors de leur contrôle. Les eaux usées seraient alors acheminées vers les stations d'épuration, pour ensuite être rejetées dans les cours d'eau sans être traitées.</p> <p>Ceci compromettrait l'ensemble des usages des cours d'eau ainsi que l'état des écosystèmes. Si vous habitez près du lac Magog ou de la rivière Magog depuis plusieurs années, sachez que la qualité de l'eau reviendrait à un niveau semblable ou pire à celle observée au cours des années 1970 et 1980. L'ensemble des usages de l'eau seraient à nouveau compromis : baignade, sports nautiques, pêche, aspects esthétiques (soupe aux pois), etc.</p> <p>Les correctifs ne pourraient être apportés immédiatement. Nous faisons donc l'hypothèse qu'un montant vous soit offert pour compenser la dégradation des cours d'eau dans la région en attendant les correctifs. Choisissez parmi les montants suivants lesquels vous jugeriez acceptable comme dédommagement dans une telle situation. Exemple B.</p>
--------	---

9. Priorités sur les enjeux d'intérêt général (PG)

PG-N1	Classez par ordre de priorité les enjeux suivants (6 pour l'enjeu le plus important et 1 pour l'enjeu le moins important) :
PG-Q1	Conciliation travail-famille
PG-Q2	Économie et marché du travail
PG-Q3	Éducation
PG-Q4	Environnement
PG-Q5	Santé
PG-Q6	Sécurité publique et criminalité

10. Caractéristiques socio-démographiques du ménage (CM)

CM-N1	La dernière série de questions porte sur les caractéristiques des ménages	
CM-Q1	Combien d'adultes (18 ans et plus) compte votre ménage ?	
CM-Q2	Combien d'enfants (moins de 18 ans) compte votre ménage ?	
CM-Q3	Quel est le plus haut niveau de scolarité complété par chaque adulte du ménage ? Secondaire (1), formation professionnelle (2), collégial (3), universitaire (4)	
CM-Q4	Dans quelle tranche d'âge se situe chaque adulte du logement ? 18-24 ans (1), 25-34 ans (2), 35-44 ans (3), 45-54 ans (4), 55-64 ans (5), 65 ans et plus (6)	
CM-Q5	Ce logement est-il la résidence permanente ou secondaire de votre ménage ? Permanente (1) ou secondaire (2)	
CM-Q6	Êtes-vous propriétaire ou locataire du logement ? Propriétaire (1), locataire (2)	
CM-Q7	Dans quelle tranche se situe le revenu annuel brut (avant impôts) de votre ménage ?	
	Moins de 10 000\$ (1)	50 000\$ à 59 999\$ (6)
	10 000\$ à 19 999\$ (2)	60 000\$ à 74 999\$ (7)
	20 000\$ à 29 999\$ (3)	75 000\$ à 89 999\$ (8)
	30 000\$ à 39 999\$ (4)	90 000\$ à 109 999\$ (9)
	40 000\$ à 49 999\$ (5)	110 000\$ et plus (10)

**Exemples de tableaux pour l'estimation de la volonté à payer
et de la volonté à accepter un consentement**

Exemple A : Seriez-vous prêts à verser le montant suivant pour une barre de chocolat ?

Montant	Oui	Peut-être	Non
0\$	X		
0,25\$	X		
0,50\$	X		
0,75\$	X		
1,00\$	X		
1,25\$		X	
1,50\$		X	
1,75\$			X
2,00\$			X
2,50\$			X
3,00\$			X

Exemple B : Accepteriez-vous de déneiger l'entrée de votre voisin, alors qu'il est en vacances, pendant un mois moyennant une compensation de ... ?

Montant	Oui	Peut-être	Non
500\$	X		
300\$	X		
200\$	X		
100\$	X		
75\$	X		
50\$	X		
30\$	X		
20\$	X		
10\$		X	
5\$			X
2\$			X
0\$			X

Feuille réponse

Utilisation des plans d'eau (UP)			
UP-Q1			UP-Q2
UP-Q3			UP-Q4
UP-Q5			UP-Q6
UP-Q7 :			

Acceptabilité des modifications au système (AM)			
AM-Q1			AM-Q2
AM-Q3			AM-Q4
AM-Q5			AM-Q6
AM-Q7			AM-Q8
AM-Q9			AM-Q10
AM-Q11			AM-Q12
AM-Q13			AM-Q14
AM-Q15			

Comportements et attitudes envers l'environnement (CE)			
CE-Q1			CE-Q2
CE-Q3			CE-Q4
CE-Q5			CE-Q6
CE-Q7			CE-Q8
CE-Q9			

Évaluation des contingences (EC)			
EC-Q1			EC-Q2
EC-Q3 :			
EC-Q4 : Seriez-vous prêts à verser un montant mensuel additionnel de... ?			
	Oui	Peut-être	Non
0\$/mois			
2\$/mois			
5\$/mois			
10\$/mois			
20\$/mois			
30\$/mois			
50\$/mois			
75\$/mois			
100\$/mois			
200\$/mois			
300\$/mois			
500\$/mois			
1000\$/mois			

EC-Q5 : Accepteriez-vous une telle situation moyennant une compensation mensuelle de... ?			
	Oui	Peut-être	Non
1000\$/mois			
500\$/mois			
300\$/mois			
200\$/mois			
100\$/mois			
75\$/mois			
50\$/mois			
30\$/mois			
20\$/mois			
10\$/mois			
5\$/mois			
2\$/mois			
0\$/mois			
EC-Q6		EC-Q7	
EC-Q8 :			
EC-Q9 : Seriez-vous prêts à verser un montant mensuel additionnel de... ?			
	Oui	Peut-être	Non
0\$/mois			
2\$/mois			
5\$/mois			
10\$/mois			
20\$/mois			
30\$/mois			
50\$/mois			
75\$/mois			
100\$/mois			
200\$/mois			
300\$/mois			
500\$/mois			
1000\$/mois			
EC-Q10 : Accepteriez-vous une telle situation moyennant une compensation mensuelle de... ?			
	Oui	Peut-être	Non
1000\$/mois			
500\$/mois			
300\$/mois			
200\$/mois			
100\$/mois			
75\$/mois			
50\$/mois			
30\$/mois			
20\$/mois			
10\$/mois			
5\$/mois			
2\$/mois			
0\$/mois			

Priorités sur les enjeux d'intérêt général (PG)			
Conciliation travail-famille			Environnement
Économie et marché du travail			Santé
Éducation			Sécurité publique et criminalité

Caractéristiques socio-démographiques du ménage (CM)			
CM-Q1	Combien d'adultes compte votre ménage ?		
CM-Q2	Combien d'enfants compte votre ménage ?		
CM-Q3	Quel est le plus haut niveau de scolarité complété par les adultes du ménage ? Secondaire (1), formation professionnelle (2), collégial (3), universitaire(4)		
	Adulte 1 (répondant)	Adulte 2 :	Adulte 3 : Adulte 4 :
CM-Q4	Dans quelle tranche d'âge se situe chaque adulte du logement ? 18-24 ans (1) 25-34 ans (2) 35-44 ans (3) 45-54 ans (4) 55-64 ans (5) 65 ans et plus (6)		
	Adulte 1 (répondant)	Adulte 2 :	Adulte 3 : Adulte 4 :
CM-Q5	Ce logement est-il la résidence permanente ou secondaire de votre ménage ? Permanente (1) Secondaire (2)		
CM-Q6	Êtes-vous propriétaire ou locataire du logement ? Propriétaire (1) Locataire (2)		
CM-Q7	Dans quelle tranche se situe le revenu annuel brut de votre ménage ?		
	Moins de 10 000\$		50 000\$ à 59 999\$
	10 000\$ à 19 999\$		60 000\$ à 74 999\$
	20 000\$ à 29 999\$		75 000\$ à 89 999\$
	30 000\$ à 39 999\$		90 000\$ à 109 999\$
	40 000\$ à 49 999\$		110 000\$ et plus

ANNEXE F – QUESTIONNAIRES POUR L'ÉVALUATION DES OPTIONS POUR LA MODERNISATION DU SMAEU

F.1 Questionnaire technique soumis aux experts



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie civil
Sherbrooke (Québec) J1K 2R1

Code du répondant
T-001

Veillez lire avant de remplir le questionnaire

Ce questionnaire vous est envoyé dans le cadre d'une recherche doctorale réalisée en génie civil à l'Université de Sherbrooke. Le projet de recherche porte sur l'intégration des principes du développement durable à la conception en ingénierie et comporte une étude de cas dans le domaine de l'assainissement des eaux usées urbaines. Votre participation est sollicitée pour étayer l'évaluation des options envisagées pour la modernisation d'un système d'assainissement (collecte et traitement). Ce dernier dessert une communauté située en Estrie.

Objectif de l'enquête

L'enquête vise à obtenir l'avis de personnes expérimentées dans le domaine de l'assainissement afin de mieux évaluer les options ciblées au cours de la conception préliminaire.

Cette consultation est menée simultanément avec l'analyse technique, l'estimation des coûts, l'analyse environnementale du cycle de vie et l'analyse de la perception des parties prenantes.

Le questionnaire a pour but d'évaluer des aspects qui doivent être pris en compte au cours du processus de conception, mais dont l'analyse repose sur le jugement expert plutôt que la modélisation.

Administration du questionnaire

Le questionnaire compte 14 pages. Le répondant peut compléter le questionnaire de façon autonome ou le faire avec le support du chercheur. Il est suggéré de répondre aux questions dans le fichier Word. Sur demande, le répondant peut obtenir un questionnaire mis en forme pour l'impression qu'il est possible de remplir sur papier puis de numériser.

Retour du questionnaire

Le répondant choisissant de remplir soi-même le questionnaire est prié de retourner celui-ci par courriel à: bruno.gagnon@usherbrooke.ca

Un avis de réception sera envoyé au répondant.

Confidentialité

Pour empêcher l'identification des personnes qui participent à la recherche, les données recueillies pour cette étude seront traitées de manière entièrement confidentielle. La confidentialité est assurée, entre autres, en attribuant un code numérique à chaque répondant. De plus, les résultats de la recherche ne seront pas présentés sous une forme qui permettra d'identifier les répondants. Les données seront détruites au plus tard en décembre 2013 et ne seront pas utilisées à d'autres fins que celles décrites dans le présent document.

À l'usage du chercheur

Code du répondant : T-001

Envoyé le : 9 décembre 2010

Retourné le :

Section 1 : Mise en contexte

Le système d'assainissement des eaux usées à l'étude est en place depuis 20 ans et dessert une communauté de petite taille (environ 4700 personnes équivalentes). Le système inclut les infrastructures servant à la collecte et au traitement des eaux usées. Les eaux usées sont en grande majorité d'origine résidentielle ou institutionnelle (90%), mais proviennent aussi dans une faible proportion de commerces ou d'industries (10%). Toutefois, les eaux usées rejetées par les installations commerciales et industrielles ont les caractéristiques des eaux usées domestiques, car elles ne sont pas liées aux procédés de production ou de fabrication.

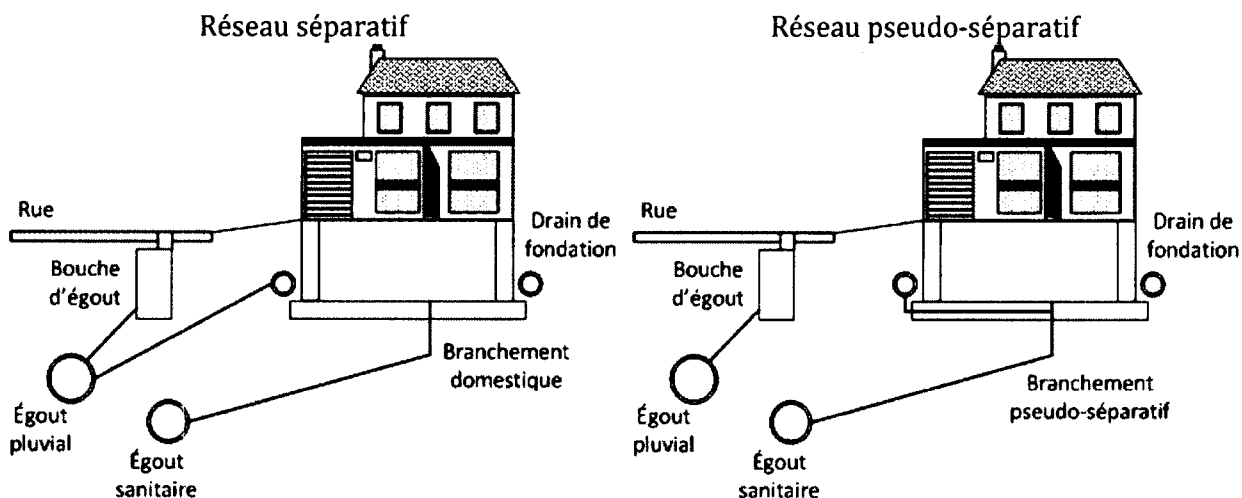
Les bâtiments desservis sont pour la plupart situés en périphérie de cours d'eau. Par conséquent, le réseau de collecte des eaux usées est relativement étendu. Les faibles dénivellations observées sur la majeure partie du territoire ont rendu nécessaire la mise en place d'un nombre élevé de postes de pompage (12) pour la portion gravitaire du réseau. Trois de ces postes de pompage disposent d'ouvrages de surverse. Des modes alternatifs de collecte des eaux usées, soit le réseau à basse pression et le réseau sous vide, sont également présents et constituent environ le tiers du réseau.

Les eaux usées sont acheminées vers une station d'épuration de type étangs aérés facultatifs. Cette technologie a très souvent été choisie pour les communautés de petite ou de moyenne taille au Québec. Les deux étangs sont chacun séparés en deux cellules, pour un total de quatre cellules. La déphosphatation y est réalisée par l'ajout d'alun entre le premier et le second étang. Les exigences de rejet à l'affluent portent sur la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5), les coliformes fécaux (C.F.) et le phosphore total (P_T).

Section 2 : Problématique

Depuis la mise en place du système, une augmentation de la population a été observée sur le territoire desservi. Le réseau de collecte et la station d'épuration sont actuellement exploités à un niveau excédant celui prévu lors de la conception.

Pour le réseau de collecte des eaux usées, l'accroissement de la population se combine à la forte présence d'eaux parasites. Plusieurs postes de pompage sont ainsi fortement sollicités. L'étude des débits a permis d'évaluer qu'environ la moitié des eaux usées acheminées à la station d'épuration, sur une base annuelle, étaient dues au captage et à l'infiltration. Les eaux de captage et d'infiltration qui rejoignent le réseau de collecte en trop grande quantité contribuent au non-respect des exigences aux ouvrages de surverse. Pour la période couvrant 2003 à 2009, des débordements non autorisés ont été observés à toutes les années, sauf en 2008. Ces débordements surviennent lors de fortes pluies ou lors de la fonte des neiges. Comme le réseau est relativement récent et est situé en bordure d'un cours d'eau, une telle présence d'eaux parasites est fort probablement associée à des branchements de type pseudo-séparatif, alors que le réseau a été conçu pour être séparatif. Tel qu'illustré au schéma ci-dessous, le branchement pseudo-séparatif achemine vers l'égout sanitaire les eaux usées domestiques et les eaux pluviales captées par les drains de fondation.



Cette configuration, bien qu'interdite par les règlements municipaux, est rencontrée sur le territoire desservi car le drainage des eaux pluviales n'y est pas assuré par des égouts pluviaux, mais plutôt par des fossés pluviaux. Il est en effet plus simple de brancher les drains de fondation directement à l'égout sanitaire plutôt que de pomper les eaux amenées par ces drains sur le terrain de la résidence ou vers le fossé pluvial.

Malgré l'accroissement de la population, à laquelle est associée une augmentation du débit et des charges polluantes acheminées à la station d'épuration, les exigences de rejet sont respectées à l'effluent (DBO_5 , C.F. et P_T). Actuellement, le débit à l'affluent est environ 1,5 fois supérieur au débit de conception et les charges à l'affluent correspondent approximativement à celles retenues pour la conception. En ce qui concerne la DBO_5 , la marge de manœuvre est toutefois faible pour le respect des exigences en hiver. Cette situation s'explique par le fait que les conditions hivernales affectent à la baisse le rendement épuratoire des étangs aérés facultatifs, vu l'effet de la température sur l'activité des microorganismes dégradant la DBO_5 .

Des zones prioritaires pour le développement résidentiel ont été ciblées sur le territoire desservi par le système d'assainissement. De plus, la construction résidentielle se poursuit dans certains secteurs présentement desservis où l'on retrouve encore des terrains vacants. L'occupation complète du territoire actuellement desservi et des zones prioritaires de développement porterait à environ 5200 personnes équivalentes la population raccordée au système d'assainissement. Ce taux de croissance correspond aux prévisions démographiques à moyen terme pour la région de l'Estrie. Vu le contexte dans lequel le système d'assainissement est actuellement exploité et l'accroissement prévu de la population, des interventions sur le réseau de collecte et la station d'épuration sont nécessaires pour assurer le respect des exigences dans le futur.

Section 3 : Solutions considérées

Les options proposées suivraient deux interventions récentes qui ont permis de réduire la pression exercée sur le réseau de collecte. En premier lieu, un programme de débranchement des gouttières mené sur le territoire a eu comme effet de réduire légèrement le débit de captage. Deuxièmement, les travaux menés aux postes de pompage les plus sollicités visant à augmenter leur capacité ont permis de réduire l'occurrence des débordements aux deux ouvrages de surverse les plus problématiques. Ces interventions sont toutefois insuffisantes pour assurer le

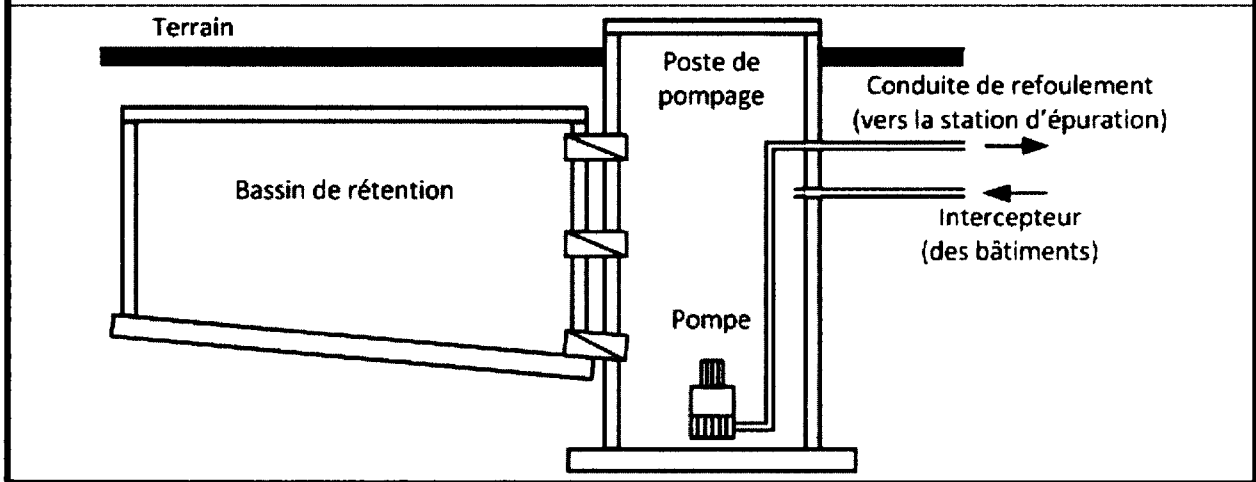
respect des exigences dans le futur si la population desservie augmente tel que prévu. Les deux solutions proposées pour le réseau de collecte seront tout d'abord présentées, suivies des trois solutions envisagées pour la station d'épuration.

Options considérées pour le réseau de collecte des eaux usées

Option A : Construction d'un bassin de rétention

Un bassin de rétention serait construit au poste de pompage le plus sollicité lors des pluies et de la période de fonte. Ceci permettrait d'éliminer les débordements actuellement observés à ce poste de pompage. L'espace nécessaire à la construction du bassin est disponible sur le terrain occupé par le poste de pompage.

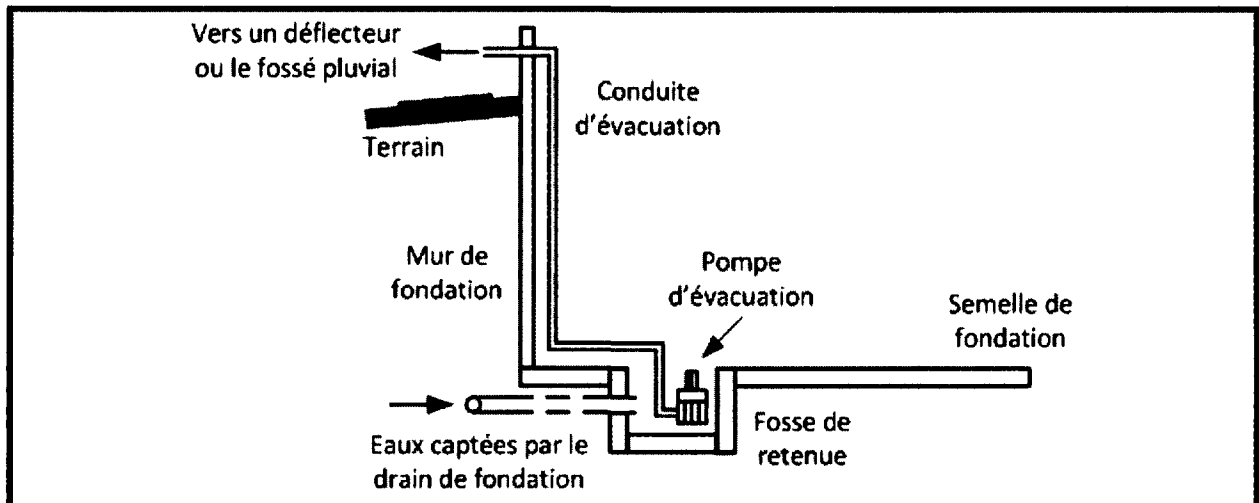
La régularisation du débit serait effectuée en reliant le trop-plein du poste de pompage au bassin de rétention. Ainsi, le débit entrant qui excède la capacité des pompes serait dirigé vers le bassin de rétention et non l'ouvrage de surverse. Au moment où le débit entrant diminuerait sous la capacité des pompes, le niveau des eaux usées dans le poste de pompage pourrait diminuer. Les eaux usées accumulées dans le bassin de régulation seraient alors retournées progressivement au poste de pompage.



Option B : Débranchement des drains de fondation

Conformément à la réglementation municipale, les drains de fondation des résidences qui sont actuellement branchés à l'égout sanitaire seraient débranchés. Les eaux pluviales captées par les drains de fondation seraient plutôt dirigées vers un déflecteur ou le fossé pluvial à l'aide d'une pompe d'évacuation (*sump pump*).

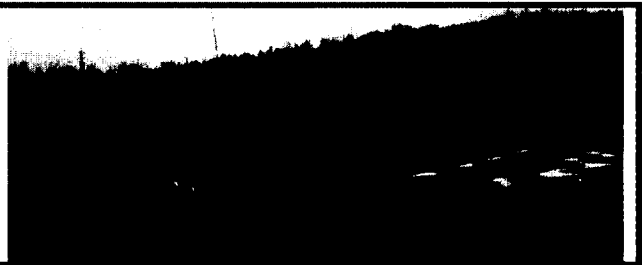
Cette solution implique de procéder à une inspection systématique des résidences pour identifier les branchements illicites. Le débit de pointe observé lors de fortes précipitations et de la fonte des neiges serait réduit à un niveau respectant la capacité des postes de pompage dans leur configuration actuelle. Cette solution a été retenue dans plusieurs villes aux États-Unis pour réduire le débit de pointe observé dans le réseau de collecte, par exemple à New Brighton (MN), Auburn Hills (MI) et Lynn (MA).



Options considérées pour la station d'épuration

Option A : Étang aéré supplémentaire

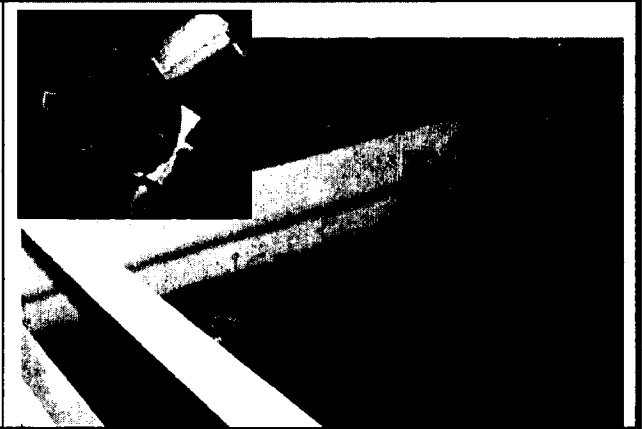
Un étang aéré facultatif semblable à ceux exploités actuellement serait construit pour augmenter la capacité de la station. Cette option a été retenue dans de nombreuses municipalités québécoises.



Option B : Bioréacteur à support fluidisé

Un bioréacteur à support fluidisé serait construit en complément aux étangs aérés existants. Cette technologie est compacte, car elle mobilise une biomasse fixée pour la dégradation de la matière organique.

La biomasse croît sur un média en plastique qui est maintenu en suspension dans un réacteur complètement mélangé. Cette technologie est utilisée aux étangs aérés de la Ville de Sainte-Julie (Québec).



Option C : Isolation de la surface des étangs

Pour accroître le rendement épuratoire des étangs aérés existants en hiver, des panneaux isolants seraient posés à la surface des étangs de manière à conserver la chaleur présente dans les eaux usées à l'affluent.

Cette technologie a été utilisée dans quelques villes du Nord des États-Unis, par exemple au Wisconsin, au Minnesota et en Iowa.



4. Critères et méthode d'évaluation

L'évaluation qui sera réalisée à la prochaine section fait appel à votre expérience et votre jugement. Vous devez vous placer dans la situation où le dimensionnement des solutions décrites précédemment a été réalisé de manière à assurer le respect des exigences, leur faisabilité technique ayant été confirmée au préalable.

Les critères techniques, choisis d'après la revue exhaustive de la littérature, sont les suivants :

- Fiabilité
- Robustesse
- Flexibilité
- Nuisances
- Développement des compétences

Ceux-ci sont définis de façon détaillée à la section suivante. Les informations obtenues par l'intermédiaire de ce questionnaire viennent compléter la modélisation de la performance des solutions, l'analyse des impacts environnementaux sur le cycle de vie, l'évaluation des coûts sur le cycle de vie et l'analyse de la perception des parties prenantes sur divers enjeux de nature sociale.

Vous serez amené à évaluer la performance des options selon une échelle à cinq niveaux. Voici la description des niveaux composant cette échelle :

Performance	Description
Inacceptable	La performance de la solution est si faible que sa mise en œuvre, de façon globale, est compromise.
Minimale	La performance de la solution est acceptable, mais implique la prise de précautions particulières ou nécessite des modifications.
Satisfaisante	La performance de la solution est conforme à ce qui normalement exigé, mais laisse place à d'éventuelles améliorations.
Bonne	La performance de la solution surpasse ce qui normalement exigé et peut difficilement être bonifiée.
Idéale	Le critère, tel que défini, est rempli de manière totale et parfaite par la solution.

Vous aurez aussi à identifier le niveau de confiance avec lequel vous avez procédé à chaque évaluation. Trois niveaux de confiance sont proposés :

Niveau de confiance	Description
Élevé	L'évaluation est précise car elle se base, par exemple, sur une expérience concrète. Le niveau de performance est choisi sans hésitation.
Modéré	L'évaluation est approximative car elle se base, par exemple, sur des connaissances techniques. Il y a hésitation entre deux niveaux de performance.
Faible	L'évaluation est très approximative car elle se base, par exemple, sur des connaissances générales. Il y a hésitation entre trois niveaux de performance.

À la suite de chaque critère, une case vide est disponible si vous désirez faire de courts commentaires (maximum trois lignes) pour détailler ou justifier votre évaluation. Vos commentaires permettront d'analyser les réponses données de manière plus approfondie.

En dernier lieu, vous aurez à vous prononcer sur la pertinence des critères lorsqu'ils sont utilisés pour choisir parmi plusieurs options envisagées. Dans le but de discriminer les critères de manière encore plus précise, vous aurez aussi à les classer en ordre de priorité.

5. Évaluation des solutions

Vous devez maintenant statuer sur la performance anticipée de chaque option selon les critères proposés. Comme vous ne connaissez pas nécessairement les caractéristiques techniques détaillées des solutions, ni la manière dont celles-ci seront mises en œuvre, vous devez assumer que le tout sera fait selon les règles de l'art.

5.1 Fiabilité

La fiabilité est définie comme la capacité d'un système à fonctionner adéquatement pour la durée de vie prédéterminée et dans les conditions prévues lors de la conception. La fiabilité dépend du risque de bris des équipements, mais son évaluation doit également considérer la gravité des conséquences résultant d'un bris.

Réseau de collecte

E1. Selon vous, la capacité de chaque option à éviter les bris d'équipement est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

E2. Selon vous, la capacité de chaque option à éviter les conséquences négatives (débordements, refoulements, risques pour la santé ou la sécurité, etc.) en cas de bris est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires (fiabilité du réseau de collecte) : Entrez vos commentaires ici.

Station d'épuration

E3. Selon vous, la capacité de chaque option à éviter les bris d'équipement est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

E4. Selon vous, la capacité de chaque option à éviter les conséquences négatives (dépassement des exigences de rejet, risques pour la santé et la sécurité, etc.) en cas de bris est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires (fiabilité de la station d'épuration) : Entrez vos commentaires ici.

5.2 Robustesse

La robustesse est définie comme la capacité d'un système à maintenir le niveau de performance prévu malgré la variabilité observée dans les conditions extérieures. Pour le réseau de collecte, la robustesse permet par exemple d'éviter les débordements et les refoulements lors de fortes précipitations ou lors de la fonte des neiges. Pour la station d'épuration, la robustesse permet par exemple de respecter les exigences de rejet, malgré les variations dans le débit, les charges polluantes et la température extérieure.

Réseau de collecte

E5. Selon vous, la contribution de chaque option à la robustesse du réseau de collecte est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

Station d'épuration

E6. Selon vous, la contribution de chaque option à la robustesse de la station d'épuration est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

5.3 Flexibilité

La flexibilité est définie comme la facilité avec laquelle un système peut être adapté pour faire face à des changements en ce qui concerne les besoins ou les exigences. Pour le réseau de collecte, la flexibilité correspond par exemple à la facilité avec laquelle il peut être modifié pour faire face aux changements démographiques ou climatiques. Pour la station d'épuration, la flexibilité est par exemple liée à la facilité de modifier les installations pour augmenter la capacité de traitement, que ce soit suite à une augmentation de la population ou au resserrement des exigences de rejet.

Réseau de collecte

E7. Selon vous, la contribution de chaque option à la flexibilité du réseau de collecte est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

Station d'épuration

E8. Selon vous, la contribution de chaque option à la flexibilité de la station d'épuration est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

5.4 Nuisances

Les nuisances correspondent à des modifications de l'environnement susceptibles de porter atteinte au bien-être ou à la santé des individus. Les nuisances du réseau de collecte sont par exemple associées au bruit, aux odeurs, aux débordements, aux refoulements ou aux altérations du paysage engendrées par les équipements de pompage. Les nuisances de la station d'épuration découlent par exemple du bruit ou des odeurs pouvant survenir à proximité du site d'implantation.

Réseau de collecte

E9. Selon vous, la capacité de chaque option à éviter les nuisances est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

Station d'épuration

E10. Selon vous, la capacité de chaque option à éviter les nuisances est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

5.5 Développement des compétences

Le développement des compétences correspond à l'acquisition de nouvelles connaissances et habiletés ou à l'approfondissement de connaissances et habiletés existantes par les employés d'une organisation. Ces connaissances et habiletés permettent d'accomplir des activités précises conformément à des exigences prédéterminées. Les principales compétences attendues d'un

professionnel sont par exemple liées à la résolution de problèmes, la communication, la gestion des risques et la gestion de projets.

Réseau de collecte

E11. Selon vous, la contribution de chaque option au développement des compétences du personnel responsable de la conception et de l'exploitation est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

Station d'épuration

E12. Selon vous, la contribution de chaque option au développement des compétences du personnel responsable de la conception et de l'exploitation est ... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

6. Proposition de critères complémentaires

Si vous jugez que des critères techniques importants ont été omis à la section 5, vous pouvez proposer jusqu'à cinq critères complémentaires aux cases suivantes :

Critère complémentaire #1	Entrez le critère ici.
Critère complémentaire #2	Entrez le critère ici.
Critère complémentaire #3	Entrez le critère ici.
Critère complémentaire #4	Entrez le critère ici.
Critère complémentaire #5	Entrez le critère ici.

Dans le cas où vous proposez des critères complémentaires, veuillez prendre en compte que d'autres aspects sont évalués en parallèle à la consultation d'experts par ce questionnaire et qu'il est ainsi normal de ne pas les retrouver à la section 5. Ces approches sont :

- La modélisation de la performance du système
- L'estimation des coûts sur le cycle de vie
- L'analyse des impacts environnementaux sur le cycle de vie
- La consultation des parties prenantes pour les enjeux de nature sociale

7. Importance des critères

Selon votre expérience, indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec les énoncés suivants.

Réseau de collecte

I1. La performance des solutions selon ces critères doit avoir une influence importante sur la prise de décision.

	Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
Fiabilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Robustesse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flexibilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nuisances	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Développement des compétences	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Station d'épuration

I2. La performance des solutions selon ces critères doit avoir une influence importante sur la prise de décision.

	Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
Fiabilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Robustesse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flexibilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nuisances	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Développement des compétences	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

I3. Classez maintenant les critères en ordre de priorité, le premier rang étant attribué au critère devant recevoir le plus d'importance et le cinquième rang au critère devant en recevoir le moins.

	Pour le réseau de collecte		Pour la station d'épuration
Fiabilité	Rang		Rang
Robustesse	Rang		Rang
Flexibilité	Rang		Rang
Nuisances	Rang		Rang
Développement des compétences	Rang		Rang

8. Profil du répondant

Les dernières questions portent sur votre profil professionnel.

P1. Indiquez à quel groupe d'âge vous appartenez :

29 ans et moins	<input type="checkbox"/>		50 à 59 ans	<input type="checkbox"/>
30 à 39 ans	<input type="checkbox"/>		60 à 69 ans	<input type="checkbox"/>
40 à 49 ans	<input type="checkbox"/>		70 ans et plus	<input type="checkbox"/>

P2. Indiquez le plus haut niveau de scolarité que vous avez atteint :

Aucun diplôme	<input type="checkbox"/>		Certificat universitaire	<input type="checkbox"/>
Diplôme d'études secondaires	<input type="checkbox"/>		Baccalauréat	<input type="checkbox"/>
Diplôme d'études professionnelles	<input type="checkbox"/>		Maîtrise ou D.E.S.S.	<input type="checkbox"/>
Diplôme d'études collégiales (CÉGEP)	<input type="checkbox"/>		Doctorat	<input type="checkbox"/>

P3. Indiquez le nombre d'années d'expérience que vous possédez dans le domaine du génie municipal, incluant la collecte et le traitement des eaux usées :

4 années ou moins	<input type="checkbox"/>		Entre 16 et 21 années	<input type="checkbox"/>
Entre 5 et 9 années	<input type="checkbox"/>		Entre 22 et 27 années	<input type="checkbox"/>
Entre 10 et 15 années	<input type="checkbox"/>		28 années ou plus	<input type="checkbox"/>

P4. Précisez dans quel secteur vous êtes actuellement employé :

Fonction publique fédérale	<input type="checkbox"/>		Sociétés d'État	<input type="checkbox"/>
Fonction publique provinciale	<input type="checkbox"/>		Génie-conseil	<input type="checkbox"/>
Municipalités ou MRC	<input type="checkbox"/>		Autre secteur (précisez)	<input type="checkbox"/>
Manufacturiers ou fournisseurs	<input type="checkbox"/>	Secteur :	Entrez le secteur ici.	

P5. Précisez tous les secteurs dans lesquels vous avez déjà pratiqué l'ingénierie (pour un minimum de 2 ans) :

Fonction publique fédérale	<input type="checkbox"/>		Sociétés d'État	<input type="checkbox"/>
Fonction publique provinciale	<input type="checkbox"/>		Génie-conseil	<input type="checkbox"/>
Municipalités ou MRC	<input type="checkbox"/>		Autre secteur (précisez)	<input type="checkbox"/>
Manufacturiers ou fournisseurs	<input type="checkbox"/>	Secteur :	Entrez le secteur ici.	

Merci, votre participation est grandement appréciée.

F.2 Questionnaire social soumis aux parties prenantes



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie civil
Sherbrooke (Québec) J1K 2R1

Code du répondant
S-001

Veillez lire avant de remplir le questionnaire

Ce questionnaire vous est envoyé dans le cadre d'une recherche doctorale réalisée en génie civil à l'Université de Sherbrooke. Le projet de recherche porte sur l'intégration des principes du développement durable à la conception en ingénierie et comporte une étude de cas dans le domaine de l'assainissement des eaux usées urbaines. Votre participation est sollicitée pour étayer l'évaluation des options envisagées pour la modernisation d'un système d'assainissement (collecte et traitement). Ce dernier dessert une communauté située en Estrie.

Objectif de l'enquête

L'enquête vise à obtenir l'avis des parties prenantes afin de mieux évaluer les options ciblées au cours de la conception préliminaire. Elle ne nécessite pas de connaissances particulières dans les domaines de l'environnement ou de l'assainissement des eaux usées.

Cette consultation est menée simultanément avec l'analyse technique, l'estimation des coûts et l'analyse environnementale du cycle de vie.

Le questionnaire a pour but de mieux comprendre la perception des répondants sur certains aspects liés au développement durable. Ces aspects pourront par la suite être pris en compte lors de l'évaluation des solutions proposées.

Administration du questionnaire

Le questionnaire compte 15 pages. Le répondant peut compléter le questionnaire de façon autonome ou le faire avec le support du chercheur. Il est suggéré de répondre aux questions dans le fichier Word. Sur demande, le répondant peut obtenir un questionnaire mis en forme pour l'impression qu'il est possible remplir sur papier puis de numériser.

Retour du questionnaire

Le répondant choisissant de remplir soi-même le questionnaire doit retourner celui-ci par courriel à l'adresse suivante : bruno.gagnon@usherbrooke.ca

Un avis de réception sera envoyé au participant.

Confidentialité

Pour empêcher l'identification des personnes qui participent à la recherche, les données recueillies par cette étude seront traitées de manière entièrement confidentielle. La confidentialité est assurée, entre autres, en attribuant un code numérique à chaque participant. De plus, les résultats de la recherche ne seront pas présentés sous une forme qui permettra d'identifier les participants. Les données seront détruites au plus tard en décembre 2013 et ne seront pas utilisées à d'autres fins que celles décrites dans le présent document.

À l'usage du chercheur

Code du répondant : S-001

Envoyé le : 10 décembre
2010

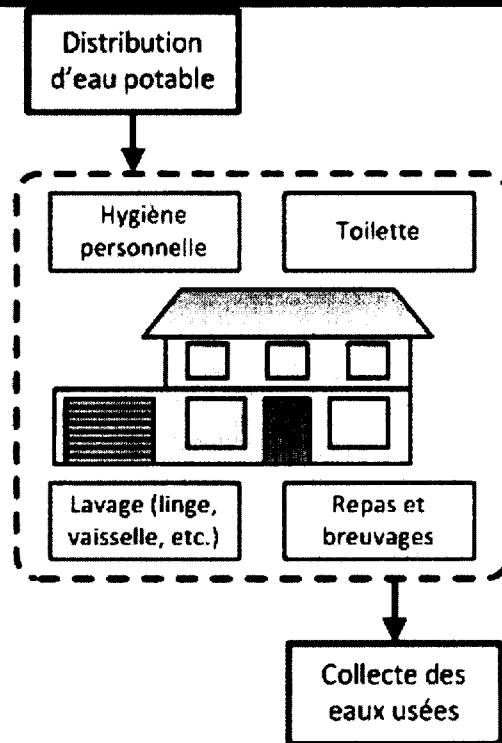
Retourné le :

Section 1 : Mise en contexte

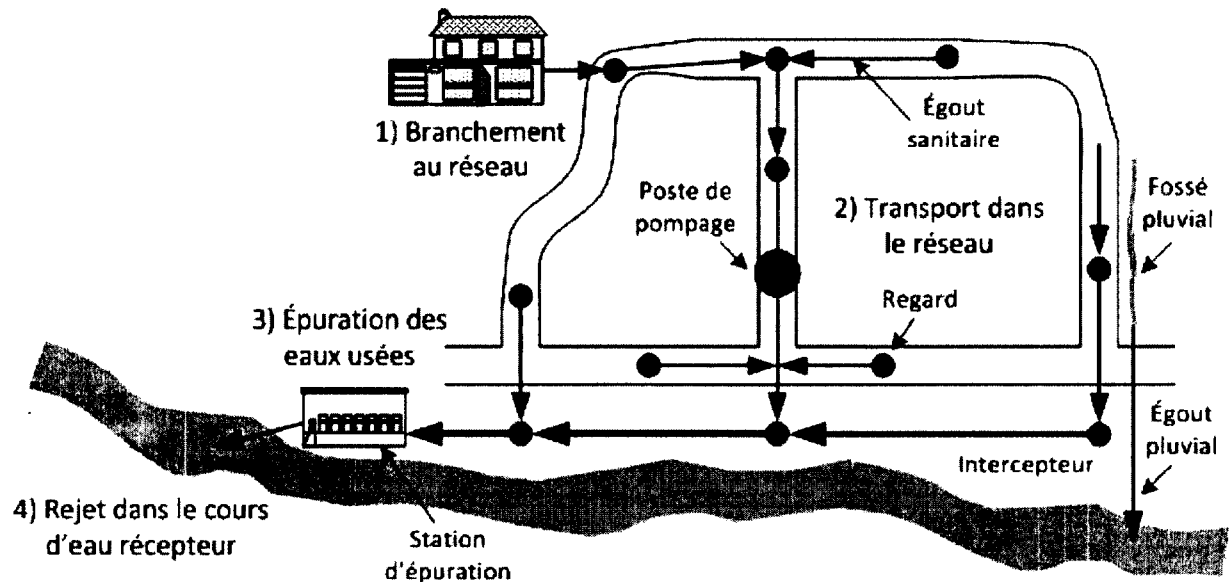
La génération d'eaux usées domestiques est liée à la consommation d'eau potable dans les résidences. Tel qu'illustré au schéma ci-contre, l'eau potable sert principalement au fonctionnement des toilettes, à l'hygiène personnelle (bains et douches) ainsi qu'au lavage (vêtements et vaisselle).

Après son utilisation, l'eau est rejetée à l'égout en étant chargée de divers contaminants (agents pathogènes, matière organique, nutriments, etc.)

La fonction du système d'assainissement est tout d'abord de protéger la santé humaine en empêchant le contact entre les eaux usées et les citoyens. Ce système permet aussi de protéger les écosystèmes, en retirant les contaminants de l'eau avant que celle-ci ne soit rejetée dans le milieu récepteur.



Le schéma ci-dessous présente les quatre principales composantes d'un système d'assainissement: (1) le branchement des résidences au réseau de collecte; (2) le transport des eaux usées dans le réseau de collecte; (3) le traitement à la station d'épuration et (4) le rejet des eaux traitées dans le cours d'eau récepteur.



La gestion des eaux usées se fait conjointement à la gestion des eaux pluviales. Cette dernière consiste à diriger la pluie tombant sur les bâtiments et les routes vers des surfaces perméables ou vers un cours d'eau. Dans les zones urbaines, les eaux pluviales transitent par des égouts pluviaux situés sous les routes tandis qu'en secteur périurbain, le drainage est plutôt réalisé par

des fossés pluviaux situés en bordure des routes. Par le phénomène d'infiltration et de captage, les eaux souterraines et pluviales rejoignent parfois le réseau de collecte des eaux usées, ce qui augmente les débits transportés dans celui-ci. Ces eaux sont nommées « eaux parasites », car elles ne devraient pas se retrouver dans l'égout sanitaire avec les eaux usées domestiques.

L'infiltration se produit lorsque les eaux souterraines parviennent à s'immiscer dans le réseau de collecte par des défauts, par exemple des joints non étanches entre les sections de conduite ou des fissures dans les conduites. Comme il est impossible de maintenir un réseau de collecte en parfait état, il est normal d'observer un certain niveau d'infiltration. Le captage est pour sa part associé aux eaux pluviales qui pénètrent directement dans le réseau de collecte par l'intermédiaire des bouches d'égout, des gouttières et des drains de fondation. Il est inévitable qu'une certaine quantité d'eau entre par les bouches d'égout. Toutefois, le branchement des gouttières et des drains de fondation à l'égout sanitaire est une pratique illicite.

Le fonctionnement des composantes du système d'assainissement à l'étude sera maintenant brièvement décrit. Ce système est en place depuis 20 ans et dessert une communauté de petite taille, soit environ 4700 habitants.

Transport dans le réseau

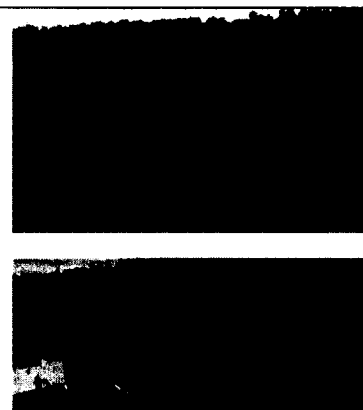
Comme le territoire desservi par le réseau de collecte des eaux usées est relativement plat, les eaux usées doivent transiter par des postes de pompage pour atteindre la station d'épuration. Ces postes de pompage sont aussi appelés postes de relèvement. Il peut survenir des débordements lorsqu'une quantité trop importante d'eaux usées y arrive subitement. Pour le système à l'étude, les débordements ne sont tolérés qu'en situation d'urgence, c'est-à-dire lors de bris d'équipement. Il ne devrait pas avoir de débordements lors de fortes précipitations ou lors de la période de fonte des neiges.



Poste de pompage

Épuration des eaux usées

Dans le système à l'étude, les contaminants sont retirés des eaux usées à l'aide d'étangs aérés. Ceux-ci sont de grands bassins creusés à même le sol. Les eaux usées y séjournent suffisamment longtemps pour que des microorganismes puissent dégrader les contaminants. L'aération y est effectuée pour maintenir les microorganismes en suspension dans l'eau et pour leur fournir de l'oxygène. L'eau traitée est rejetée au cours d'eau récepteur et doit respecter les exigences fixées par le gouvernement provincial.



Étangs aérés

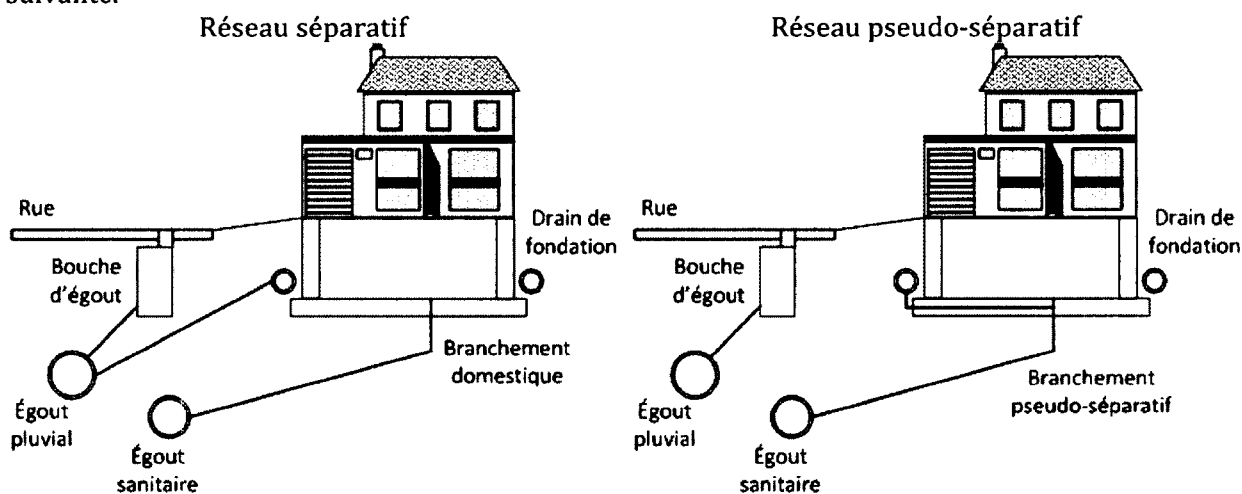
Les bâtiments desservis par le système à l'étude sont pour la plupart situés en périphérie d'un cours d'eau. Les eaux usées sont en grande majorité d'origine résidentielle ou institutionnelle, mais proviennent aussi dans une faible proportion de commerces ou d'industries. Toutefois, les

eaux usées rejetées à l'égout par les installations commerciales et industrielles ont les caractéristiques des eaux usées domestiques, car elles ne proviennent pas des procédés de production ou de fabrication.

Section 2 : Problématique

Depuis la mise en place du système, une augmentation de la population a été observée sur le territoire desservi. Le réseau de collecte et la station d'épuration sont actuellement exploités à un niveau excédant celui prévu lors de la conception.

Pour le réseau de collecte des eaux usées, l'accroissement de la population se combine à la forte présence d'eaux parasites, ce qui implique que plusieurs postes de pompage sont fortement sollicités. Les eaux de captage et d'infiltration qui rejoignent le réseau de collecte en trop grande quantité contribuent aux débordements observés à certains postes de pompage. Pour la période couvrant 2003 à 2009, des débordements non autorisés ont été observés à toutes les années, sauf en 2008. Ces débordements surviennent lors de fortes pluies ou lors de la fonte des neiges. Comme le réseau est relativement récent et est situé en bordure d'un cours d'eau, une telle présence d'eaux parasites est fort probablement associée au branchement des drains de fondation à l'égout sanitaire. Ce type de branchement est nommé « pseudo-séparatif ». Cette configuration contribue à amener un débit trop élevé dans le réseau de collecte car celui-ci a été conçu pour être séparatif. La distinction entre les deux types de réseau est illustrée à la page suivante.



Le branchement des drains de fondation, bien qu'interdit par les règlements municipaux, est rencontré sur le territoire desservi car le drainage des eaux pluviales n'y est pas assuré par des égouts pluviaux, mais plutôt par des fossés pluviaux. Il est en effet plus simple de brancher les drains de fondation directement à l'égout sanitaire plutôt que de pomper les eaux amenées par ces drains sur le terrain de la résidence ou vers le fossé pluvial. L'étude des débits a permis d'évaluer qu'environ la moitié des eaux usées acheminées à la station d'épuration, sur une base annuelle, étaient dues au captage et à l'infiltration. Ce taux est beaucoup trop élevé lorsqu'on le compare à celui observé dans des réseaux similaires.

Malgré l'accroissement de la population, à laquelle est associée une augmentation du débit d'eaux usées et des quantités de polluants acheminées à la station d'épuration, les exigences de rejet imposées par le gouvernement sont présentement respectées. La marge de manœuvre est

toutefois faible pour le respect des exigences en hiver. Cette situation s'explique par le fait que les conditions hivernales affectent à la baisse le rendement épuratoire des étangs aérés. En effet, l'activité des microorganismes dégradant les contaminants est ralentie lorsque la température de l'eau est plus froide.

Des zones prioritaires pour le développement résidentiel ont été ciblées sur le territoire desservi par le système d'assainissement. De plus, la construction résidentielle se poursuit dans certains secteurs présentement desservis où l'on retrouve encore des terrains vacants. L'occupation complète du territoire actuellement desservi et des zones prioritaires de développement aurait pour conséquence d'augmenter d'au moins 10% la population raccordée au système d'assainissement. Vu le contexte dans lequel le système d'assainissement est actuellement exploité et l'accroissement prévu de la population, des interventions sur le réseau de collecte et la station d'épuration sont nécessaires pour assurer le respect des exigences dans le futur.

Section 3 : Solutions considérées

Les options proposées suivraient deux interventions récentes qui ont permis de réduire la pression exercée sur le réseau de collecte. En premier lieu, un programme de débranchement des gouttières mené sur le territoire a eu comme effet de réduire le phénomène de captage. Deuxièmement, des travaux menés aux postes de pompage les plus sollicités visant à augmenter leur capacité ont permis de réduire l'occurrence des débordements. Ces interventions sont toutefois insuffisantes pour assurer le respect des exigences dans le futur si la population desservie augmente tel que prévu.

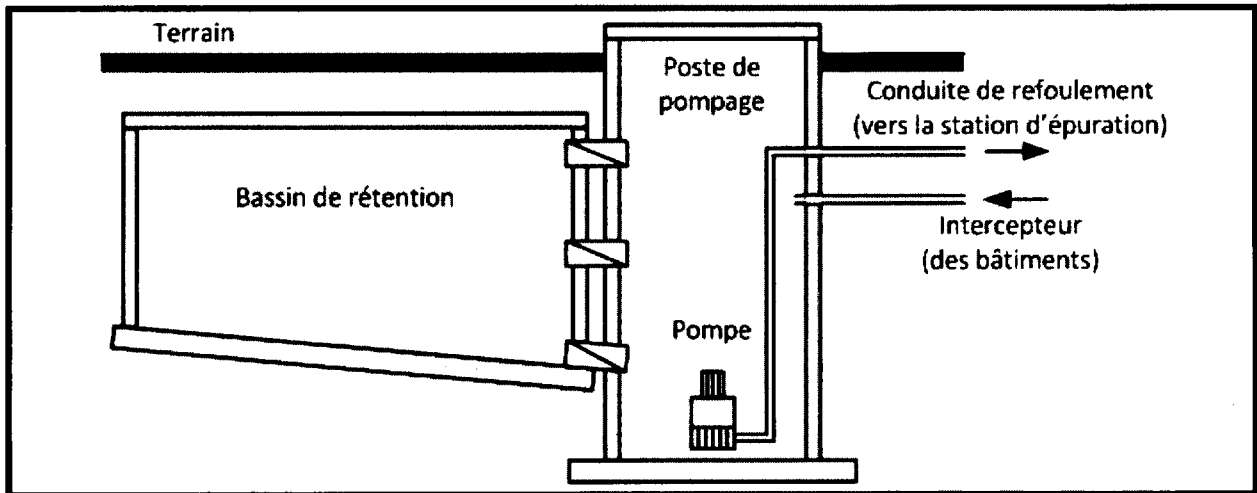
Les deux solutions proposées pour le réseau de collecte seront tout d'abord présentées, suivies des trois solutions envisagées pour la station d'épuration.

Options considérées pour le réseau de collecte des eaux usées

Option A : Construction d'un bassin de rétention

Un bassin de rétention serait construit au poste de pompage le plus sollicité lors des pluies et de la période de fonte. Ceci permettrait d'éliminer les débordements actuellement observés à ce poste de pompage.

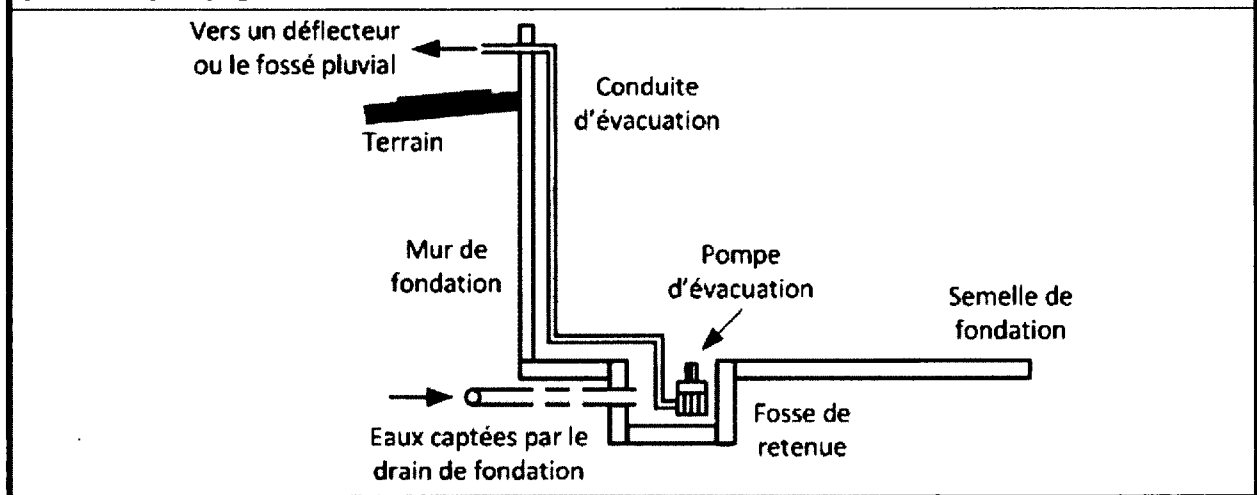
Dans le cas où la quantité d'eau entrant au poste de pompage excéderait la capacité des pompes, le débordement serait dirigé vers le bassin de rétention plutôt que vers le cours d'eau. Après une certaine période de temps, la quantité d'eaux usées arrivant au poste de pompage diminuerait et les pompes seraient alors en mesure de vider celui-ci. Les eaux usées accumulées dans le bassin de rétention seraient à ce moment retournées progressivement au poste de pompage. Cette solution a été mise en œuvre dans de nombreuses municipalités au Québec.



Option B : Débranchement des drains de fondation

Conformément à la réglementation municipale, les drains de fondation des résidences qui sont actuellement branchées à l'égout sanitaire seraient débranchés. Les eaux pluviales captées par les drains de fondation seraient plutôt dirigées vers un déflecteur ou le fossé pluvial à l'aide d'une pompe d'évacuation (*sump pump*).

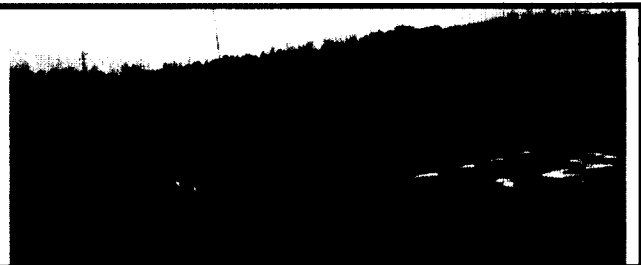
Cette solution implique de procéder à une inspection systématique des résidences pour identifier les branchements illicites. La quantité d'eau acheminée aux postes de pompage lors de fortes précipitations et de la fonte des neiges serait réduite à un niveau respectant la capacité des postes de pompage. Cette solution a été mise en œuvre dans plusieurs villes aux États-Unis.



Options considérées pour la station d'épuration

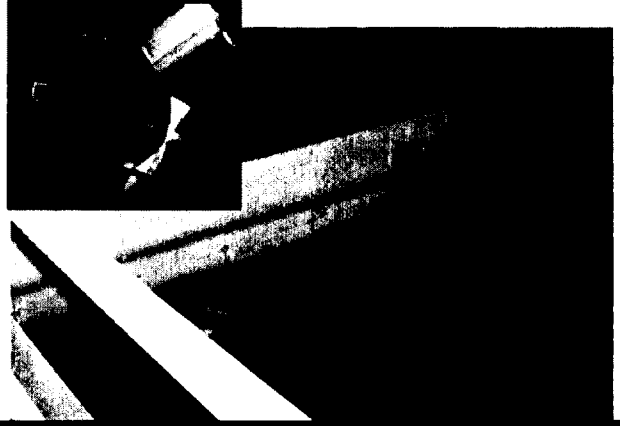
Option A : Étang aéré supplémentaire

Un étang aéré semblable à ceux exploités actuellement serait construit pour augmenter la capacité de la station. Cette option a été retenue dans de nombreuses municipalités québécoises.



Option B : Bioréacteur

Un bioréacteur serait construit en complément aux étangs aérés existants. Cette technologie occupe moins d'espace que les étangs aérés, car les microorganismes peuvent se fixer sur des cylindres en plastique maintenus en suspension dans un bassin. Les microorganismes sont présents en grand nombre, ce qui permet d'atteindre une haute efficacité. Cette technologie est utilisée aux étangs aérés de la ville de Sainte-Julie (Québec).



Option C : Isolation de la surface des étangs

Pour accroître la performance des étangs aérés existants en hiver, des panneaux isolants seraient installés à leur surface. La chaleur contenue dans les eaux usées arrivant à la station serait conservée et les microorganismes verraient leur activité épuratoire augmenter.

Cette technologie a été utilisée dans quelques villes du Nord des États-Unis.



4. Critères et méthode d'évaluation

L'évaluation qui sera réalisée à la prochaine section porte sur des critères qui peuvent s'avérer difficiles à prendre en compte par les ingénieurs lors de l'élaboration de solutions techniques. Vous devez vous placer dans la situation où la faisabilité technique des solutions a été confirmée au préalable et que celles-ci permettent le respect des exigences gouvernementales.

Les critères, choisis d'après la revue exhaustive de la littérature, sont les suivants :

- Comportements responsables
- Acceptabilité
- Équité

Ceux-ci sont définis de façon détaillée à la section suivante. Les informations obtenues par l'intermédiaire de ce questionnaire viennent compléter l'analyse technique des solutions, l'analyse des impacts environnementaux sur le cycle de vie et l'évaluation des coûts sur le cycle de vie. Vous serez tout d'abord amenés à vous prononcer sur la capacité des solutions proposées à influencer la performance du système selon les critères mentionnés. Si vous jugez que les solutions peuvent avoir une telle influence, vous aurez ensuite à évaluer leur performance selon une échelle à cinq niveaux. Voici la description des niveaux composant cette échelle :

Performance	Description
Inacceptable	La performance de la solution est si faible que sa mise en œuvre, de façon globale, est compromise.
Minimale	La performance de la solution est acceptable, mais implique la prise de précautions particulières ou nécessite des modifications.
Satisfaisante	La performance de la solution est conforme à ce qui normalement exigé, mais laisse place à d'éventuelles améliorations.
Bonne	La performance de la solution surpasse ce qui normalement exigé et peut difficilement être bonifiée.
Idéale	Le critère, tel que défini, est rempli de manière totale et parfaite par la solution.

Vous aurez aussi à identifier le niveau de confiance avec lequel vous avez procédé à chaque évaluation. Trois niveaux de confiance sont proposés :

Niveau de confiance	Description
Élevé	L'évaluation est précise et le niveau de performance est choisi sans hésitation.
Modéré	L'évaluation est approximative et il y a hésitation entre deux niveaux de performance.
Faible	L'évaluation est très approximative et il y a hésitation entre trois niveaux de performance.

À la suite de chaque critère, une case vide est disponible si vous désirez faire de courts commentaires (maximum trois lignes) pour détailler ou justifier votre évaluation. Vos commentaires permettront d'analyser les réponses données de manière plus approfondie.

En dernier lieu, vous aurez à vous prononcer sur la pertinence des critères lorsqu'ils sont utilisés pour choisir parmi plusieurs options envisagées. Dans le but de discriminer les critères de manière encore plus précise, vous aurez aussi à les classer en ordre de priorité.

5. Évaluation des solutions

Vous devez maintenant indiquer votre avis quant à l'influence des solutions proposés sur les critères suggérés ainsi que sur la performance anticipée de chaque option lorsque cela s'applique.

5.1 Comportements responsables

Les comportements des citoyens sont considérés responsables dans la mesure où ils sont compatibles avec le bon fonctionnement du système d'assainissement et ils facilitent le respect des exigences, autant pour le réseau de collecte que pour la station d'épuration.

E1. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

La technologie retenue pour le réseau de collecte peut influencer l'adoption de comportements responsables

Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Répondez à la question **E2** seulement si vous êtes **fortement en accord** ou **plutôt en accord** avec l'énoncé de la question **E1**. Sinon, passez à la question **E3**.

E2. Selon vous, la capacité de chaque option à favoriser l'adoption de comportements responsables est... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

E3. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

La technologie retenue pour la station d'épuration peut influencer l'adoption de comportements responsables

Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Répondez à la question **E4** seulement si vous êtes **fortement en accord** ou **plutôt en accord** avec l'énoncé de la question **E3**. Sinon, passez à la section 5.2.

E4. Selon vous, la capacité de chaque option à favoriser l'adoption de comportements responsables est... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

5.2 Acceptabilité

L'acceptabilité s'exprime de différentes formes en fonction de la nature des projets rencontrés. Pour les projets réalisés à l'échelle du ménage, l'acceptabilité consiste en la volonté d'adopter

une technologie donnée ou en la volonté de modifier ses comportements. Pour les projets réalisés à l'échelle de la communauté, l'acceptabilité se traduit plutôt par un support aux solutions proposées par l'organisation responsable.

E5. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec les énoncés suivants :

Selon vous, l'acceptabilité des solutions proposées pour le système d'assainissement dépend ...

	Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
Des frais exigés pour financer les investissements	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Des changements requis dans les habitudes de vie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Des gains environnementaux anticipés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Des nuisances ou désagréments anticipés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

E6. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

L'acceptabilité du projet de modernisation est influencée par la technologie retenue pour le réseau de collecte

Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Répondez à la question E7 seulement si vous êtes **fortement en accord** ou **plutôt en accord** avec l'énoncé de la question E6. Sinon, passez à la question E8.

E7. Selon vous, l'acceptabilité de chaque option est... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

E8. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

L'acceptabilité du projet de modernisation est influencée par la technologie retenue pour la station d'épuration

Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Répondez à la question E9 seulement si vous êtes **fortement en accord** ou **plutôt en accord** avec l'énoncé de la question E8. Sinon, passez à la section 5.3.

E9. Selon vous, l'acceptabilité de chaque option est... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

5.3 Équité

De manière générale, l'équité fait référence à un traitement juste des individus qui tient compte des particularités de leur situation. Ce concept est toutefois interprété de multiples façons.

E10. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec les énoncés suivants :

Selon vous, un système d'assainissement est géré de manière équitable si... ?

	Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
La contribution exigée est liée à la quantité d'eau rejetée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
La contribution exigée est liée à la capacité de payer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Les citoyens qui subissent des nuisances sont compensés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
L'accès aux plans d'eau protégés est facile pour tous	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Les décisions sont prises en consultant les intéressés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
La réglementation est appliquée de manière uniforme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

E11. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

La technologie retenue pour le réseau de collecte peut influencer la gestion équitable du système

Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Répondez à la question **E12** seulement si vous êtes **fortement en accord** ou **plutôt en accord** avec l'énoncé de la question **E11**. Sinon, passez à la question **E13**.

E12. Selon vous, chaque option contribue à la gestion équitable du système de manière... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Bassin de rétention	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Drains de fondation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

E13. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

La technologie retenue pour la station d'épuration peut influencer la gestion équitable du système

Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Répondez à la question E14 seulement si vous êtes **fortement en accord** ou **plutôt en accord** avec l'énoncé de la question E13. Sinon, passez à la section 6.

E14. Selon vous, chaque option contribue à la gestion équitable du système de manière... ?

	Inacceptable	Minimale	Satisfaisante	Bonne	Idéale	Confiance
A. Étang aéré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
B. Bioréacteur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau
C. Isolation des étangs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau

Commentaires : Entrez vos commentaires ici.

6. Proposition de critères complémentaires

Si vous jugez que des critères importants ont été omis à la section 5, vous pouvez proposer jusqu'à trois critères complémentaires aux cases suivantes :

Critère complémentaire #1	Entrez le critère ici.
Critère complémentaire #2	Entrez le critère ici.
Critère complémentaire #3	Entrez le critère ici.

Dans le cas où vous proposez des critères complémentaires, veuillez prendre en compte que d'autres aspects sont évalués en parallèle à la consultation des parties prenantes par ce questionnaire et qu'il est ainsi normal de ne pas les retrouver à la section 5. Ces approches sont :

- L'analyse technique du système
- L'estimation des coûts sur le cycle de vie
- L'analyse des impacts environnementaux sur le cycle de vie

7. Importance des critères

11. Indiquez si vous êtes en accord ou en désaccord avec l'énoncé suivant :

La performance des solutions selon le critère en question doit influencer la prise de décision.

	Fortement en accord	Plutôt en accord	Plutôt en désaccord	Fortement en désaccord
Comportements responsables	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Acceptabilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Équité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

12. Classez maintenant les critères en ordre de priorité, le premier rang étant attribué au critère le plus important et le cinquième rang au critère le moins important.

	Comportements responsables	Acceptabilité	Équité
Rang du critère	Rang	Rang	Rang

8. Profil du répondant

Les dernières questions portent sur le profil socio-économique du répondant. Pour des raisons de respect de la vie privée, vous êtes libre d'y répondre ou non.

P1. Indiquez à quel groupe d'âge vous appartenez :

20 à 29 ans	<input type="checkbox"/>	50 à 59 ans	<input type="checkbox"/>
30 à 39 ans	<input type="checkbox"/>	60 à 69 ans	<input type="checkbox"/>
40 à 49 ans	<input type="checkbox"/>	70 ans et plus	<input type="checkbox"/>

P2. Indiquez le plus haut niveau de scolarité atteint :

Aucun diplôme	<input type="checkbox"/>	Certificat universitaire	<input type="checkbox"/>
Diplôme d'études secondaires	<input type="checkbox"/>	Baccalauréat	<input type="checkbox"/>
Diplôme d'études professionnelles	<input type="checkbox"/>	Maîtrise ou D.É.S.S.	<input type="checkbox"/>
Diplôme d'études collégiales (CÉGEP)	<input type="checkbox"/>	Doctorat	<input type="checkbox"/>

P3. Indiquez le nombre d'adultes (18 ans et plus) et d'enfants (moins de 18 ans) dans votre ménage.

Adultes	Nombre	Enfants	Nombre
---------	--------	---------	--------

P4. Êtes-vous propriétaire ou locataire du logement où réside votre ménage ?

Propriétaire	<input type="checkbox"/>	Locataire	<input type="checkbox"/>
--------------	--------------------------	-----------	--------------------------

P5. Indiquez dans quelle tranche de revenu se situe le revenu brut (avant impôts) de votre ménage.

Moins de 10 000\$	<input type="checkbox"/>	50 000\$ à 59 999\$	<input type="checkbox"/>
10 000\$ à 19 999\$	<input type="checkbox"/>	60 000\$ à 69 999\$	<input type="checkbox"/>
20 000\$ à 29 999\$	<input type="checkbox"/>	70 000\$ à 79 999\$	<input type="checkbox"/>
30 000\$ à 39 999\$	<input type="checkbox"/>	80 000\$ à 89 999\$	<input type="checkbox"/>
40 000\$ à 49 999\$	<input type="checkbox"/>	90 000\$ à 99 999\$	<input type="checkbox"/>
		100 000\$ et plus	<input type="checkbox"/>

Merci, votre participation est grandement appréciée.

ANNEXE G - DÉBITS DANS LE RÉSEAU DE COLLECTE

La période de fonte a été traitée de manière distincte, car l'augmentation simultanée des débits de captage et d'infiltration rend impossible de distinguer chacun d'entre eux. Le débit parasite calculé lors de la fonte a été intégré aux débits parasites annuels moyens selon la répartition observée lors de fortes précipitations entre l'infiltration (65%), le captage direct (15%) et le captage indirect (20%).

Tableau G.1 – Analyse des débits pour l'année 2005

Mois	Q _{moy} (m ³ /d)	Q _{dom} (m ³ /d)	Q _{domep} (m ³ /d)	Q _{inf} (m ³ /d)	Q _{cap,d} (m ³ /d)	Q _{cap,i} (m ³ /d)	Q _{par} (m ³ /d)	Pr (mm)	Pr _{moy} (mm)	N - N _{moy} (m)
Jan.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16	25	+0,25
Fév.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9	17	+0,04
Mars	1154	740	833	415	0	0	414	7	23	-0,34
Avr.	1982	837	856	841	114	183	1145	92	56	-0,07
Mai	1573	802	842	615	37	96	771	79	97	-0,16
Juin	1647	873	n.d.	552	64	154	773	121	111	-0,03
Juil.	1337	809	n.d.	468	40	22	528	147	118	-0,07
Août	1207	796	n.d.	392	9	6	410	107	130	-0,15
Sept.	1347	733	n.d.	476	44	75	614	106	105	-0,06
Oct.	2010	850	865	754	235	173	1161	227	93	+0,29
Nov.	1825	864	782	773	97	83	961	102	70	+0,35
Déc.	1633	853	811	641	38	121	779	41	34	+0,21
Fon.	2201	850	848	n.d.	n.d.	n.d.	1351	37	28	n.d.
Moy.	1615	820	832	602	75	101	782	1091	907	+0,02

Période de fonte : 20 mars 2005 au 6 avril 2005

Lors de l'année 2005, les débits d'eaux parasites les plus élevés ont été observés en avril, suite à la fonte des neiges, puis lors des fortes pluies des mois d'octobre et de novembre accompagnées d'une hausse de la nappe phréatique. Les précipitations liquides totales en 2005 ont été légèrement plus élevées que la moyenne, ce qui explique en partie le fort débit de captage moyen.

Tableau G.2 – Analyse des débits pour l'année 2006

Mois	Q _{moy} (m ³ /d)	Q _{dom} (m ³ /d)	Q _{domep} (m ³ /d)	Q _{inf} (m ³ /d)	Q _{cap,d} (m ³ /d)	Q _{cap,i} (m ³ /d)	Q _{par} (m ³ /d)	Pr (mm)	Pr _{moy} (mm)	N - N _{moy} (m)
Jan.	1645	859	807	690	50	67	786	38	22	+0,32
Fév.	1412	784	789	607	10	9	628	14	13	+0,22
Mars	1379	813	807	544	0	0	566	7	24	-0,12
Avr.	1726	843	855	758	61	64	883	86	70	-0,39
Mai	1865	800	991	839	109	119	1065	155	97	-0,10
Juin	1871	900	n.d.	754	100	106	970	155	111	+0,06
Juil.	1660	864	n.d.	704	36	74	796	113	118	-0,03
Août	1788	827	n.d.	734	126	105	961	206	130	0,00
Sept.	1337	768	n.d.	549	18	5	569	49	105	-0,08
Oct.	1774	811	828	720	113	102	962	140	93	+0,06
Nov.	1601	789	781	733	23	42	812	54	70	+0,09
Déc.	1717	858	793	639	68	150	859	89	34	+0,18
Fon.	2017	795	819	n.d.	n.d.	n.d.	1222	57	20	n.d.
Moy.	1681	823	833	667	69	83	856	1163	907	+0,02

Période de fonte : 12 au 15 janvier 2006, 2 au 7 février 2006 et 10 au 19 mars 2006

Au courant de l'année 2006, les mois d'avril à août ont connu des précipitations égales ou supérieures à la normale, ce qui est la principale cause des forts débits de captage observés durant ces mois. Le niveau de la nappe phréatique a aussi été plus élevé que la moyenne en hiver et en automne, ceci ayant un impact sur le débit d'infiltration moyen durant les mois concernés ainsi que sur la moyenne annuelle.

Tableau G.3 - Analyse des débits pour l'année 2007

Mois	Q _{moy} (m ³ /d)	Q _{dom} (m ³ /d)	Q _{domep} (m ³ /d)	Q _{inf} (m ³ /d)	Q _{cap,d} (m ³ /d)	Q _{cap,i} (m ³ /d)	Q _{par} (m ³ /d)	Pr (mm)	Pr _{moy} (mm)	N - N _{moy} (m)
Jan.	1583	783	779	647	33	91	800	43	25	+0,13
Fév.	1182	768	796	407	0	0	414	0	17	-0,12
Mars	1306	745	789	528	0	0	561	3	20	-0,20
Avr.	1886	889	821	1019	5	3	998	16	44	-0,16
Mai	1687	808	882	780	53	67	879	98	97	-0,16
Juin	1505	849	n.d.	535	38	34	656	86	111	-0,15
Juil.	1444	890	n.d.	524	21	29	555	77	118	-0,01
Août	1441	866	n.d.	499	32	42	575	131	130	+0,03
Sept.	1382	921	n.d.	432	25	22	462	76	105	-0,01
Oct.	1511	n.d.	922	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	117	93	+0,04
Nov.	1694	n.d.	898	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	85	70	+0,33
Déc.	1519	n.d.	849	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7	34	+0,16
Fon.	2690	809	811	n.d.	n.d.	n.d.	1881	62	43	n.d.
Moy.	1606	839	827	617	43	59	723	801	907	-0,01

Période de fonte : 13 au 16 mars 2007, 22 mars 2007 au 5 avril 2007 et 14 au 19 avril 2007

Les débits parasites observés en 2007 ont été influencés à la hausse par la longue période de fonte des neiges en début d'année, puis à la baisse par les faibles précipitations enregistrés lors des mois suivants. Les débits moyens pour les mois d'octobre à décembre (en italique) correspondent aux débits mesurés à l'effluent car les débits à l'affluent n'étaient pas disponibles.

Tableau G.4 - Analyse des débits pour l'année 2008

Mois	Q _{moy} (m ³ /d)	Q _{dom} (m ³ /d)	Q _{domep} (m ³ /d)	Q _{inf} (m ³ /d)	Q _{cap,d} (m ³ /d)	Q _{cap,i} (m ³ /d)	Q _{par} (m ³ /d)	Pr (mm)	Pr _{moy} (mm)	N - N _{moy} (m)
Jan.	1682	n.d.	820	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	36	25	+0,16
Fév.	1426	n.d.	804	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11	17	+0,08
Mars	1672	n.d.	793	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9	37	-0,12
Avr.	2545	n.d.	852	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	69	70	-0,05
Mai	1470	n.d.	1020	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55	97	-0,20
Juin	1941	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	170	111	-0,11
Juil.	1688	835	n.d.	663	93	84	853	193	118	-0,02
Août	1948	821	n.d.	872	117	131	1127	138	130	+0,31
Sept.	1371	783	n.d.	538	22	21	588	57	105	-0,06
Oct.	1448	n.d.	821	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	83	93	-0,09
Nov.	1583	801	746	711	23	19	782	53	70	+0,17
Déc.	1602	n.d.	749	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	51	34	+0,22
Fon.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Moy.	1648	810	826	696	64	64	838	925	907	+0,02

Période de fonte : 15 mars 2008 au 14 avril 2008

Lors de l'année 2008, l'été a été caractérisé par de très fortes précipitations, ce qui a eu un effet sur les débits parasites observés aux mois de juillet et août. Bien que les précipitations totales

aient été plus importantes en juillet qu'en août, les épisodes de pluie du mois d'août ont été plus rares et plus intenses, ce qui explique que les débits de captage mesurés aient été plus élevés durant ce mois. De plus, les fortes précipitations de juin et juillet ont eu pour effet de saturer le sol en eau et de contribuer à la hausse du niveau de la nappe phréatique observée en août. Les débits moyens pour les mois de janvier à juin, octobre et décembre correspondent aux débits mesurés à l'effluent (en italique) car les débits à l'affluent ne sont pas disponibles.

ANNEXE H - ANALYSE TECHNIQUE DU SMAEU EXISTANT

H.1 Population desservie (1989 et 2008)

Sous-bassin	1989			2008		
	Résidentiel	ICI	Total	Résidentiel	ICI	Total
A	225	0	225	263	0	263
B	183	0	183	183	30	213
C	90	0	90	83	0	83
D	39	0	39	78	0	78
E	60	0	60	53	0	53
F	201	0	201	221	0	221
G	18	0	18	64	0	64
GA1	42	0	42	53	0	53
GA2	605	0	885	700	430	1130
GB1	421	0	421	385	0	385
GB2	122	0	122	166	0	166
GB3	131	0	131	355	0	355
H	75	0	75	240	0	240
I	255	0	255	213	0	213
J	0	290	290	n.a.	290	290
K	306	0	306	392	0	392
L	111	0	111	275	0	275
M	0	0	n.a.	182	70	252
Total	2884	570	3454	3906	820	4726

H.2 Enlèvement de la DBO₅ et du phosphore à la station

L'enlèvement de la DBO₅ observé est comparé à celui calculé par le modèle de premier ordre proposé par le MDDEP [2010a] (équation H.1).

$$S_e = S_o \left(\frac{1}{1 + K_e t} \right) FC \quad (H.1)$$

Où :

S_e : DBO₅ à l'effluent de l'étang (mg/L)

S_o : DBO₅ à l'affluent de l'étang (mg/L)

K_e : Taux d'enlèvement de la DBO₅ ou constante cinétique (d⁻¹)

t : temps de rétention (d)

FC : facteur de correction saisonnier (apport de DBO₅ dû à la décomposition des boues)

La même équation s'applique à toutes les cellules de l'étang, l'effluent de la cellule 1 devenant l'affluent de la cellule 2 et ainsi de suite. Un facteur de correction saisonnier s'applique aux deux premières cellules lorsqu'une série de trois ou plus est utilisée (1,2 l'été et 1,05 l'hiver). Le temps de rétention est calculé à partir du débit à l'affluent et du volume des cellules (équation H.2).

$$t_{cellule} = \frac{V_{cellule}}{Q_{moy}} \quad (H.2)$$

Où :

$V_{cellule}$: Volume (ajusté) de la cellule de l'étang (m³)

Q : Débit moyen à l'affluent (m³/d)

Le volume des cellules est ajusté pour tenir compte du volume occupé par les boues (10%) ainsi que les glaces l'hiver (5%). Une valeur de 0,37 est recommandée par le MDDEP [2010a] pour le taux d'enlèvement à 20°C et celui-ci varie en fonction de la température selon l'équation H.3.

$$K_e(T) = K_{e20} \theta^{(T-20)} \quad (H.3)$$

Où :

T : Température de l'eau dans la cellule (°C)

$K_e(T)$: Taux d'enlèvement à la température T (d⁻¹)

K_{e20} : Taux d'enlèvement à 20°C (0,37d⁻¹)

θ : coefficient de température (1,07)

Teknika [1997] a proposé des valeurs différentes du MDDEP [2010a] pour le taux d'enlèvement et le coefficient de température suite à une étude sur la station d'épuration de Saint-Élie-d'Orford de type étangs aérés facultatifs, soit 0,285 pour K_{e20} et 1,037 pour θ . La performance anticipée par les équations 6.8 à 6.10 a été calculée selon trois variantes, puis comparée aux mesures à l'effluent de la station de Deauville. La première variante se base sur le volume des étangs à la conception et les températures proposées par le MDDEP [2010a]. Les valeurs nécessaires aux calculs sont énumérées au tableau 6.16 pour chacune des saisons de l'année 2006.

Tableau H.1 Données de base pour le calcul de l'enlèvement de la DBO₅

	Qmoy (m ³ /d)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	V cellule (m ³)	t cellule (d)	T (°C)
Hiver	1603	196	119	6559	4,09	0,5
Print.	1761	196	117	6944	3,94	4
Été	1571	196	111	6944	4,42	16
Aut.	1685	196	127	6944	4,12	4

La seconde variante se base sur le volume effectif mesuré en 2006, qui tient compte du niveau de l'eau réel et du volume occupé par les boues. Les températures moyennes mesurées en 2006 sont également utilisées au lieu de celles proposées par le MDDEP [2010a]. Les valeurs ajustées pour la seconde variante, décrites au tableau 6.17, servent également aux calculs pour la troisième variante qui intègre les constantes de cinétique proposées par Teknika [1997].

Tableau H.2 Données ajustées pour le calcul de l'enlèvement de la DBO₅

	Qmoy (m ³ /d)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	V cell. (m ³)	t cell. (d)	T - E1 (°C)		T - E2 (°C)
						Cell. 1	Cell. 2	
Hiver	1603	196	118,6	7133	4,45	3	2	1
Print.	1761	196	117,4	7553	4,29	14	14	15
Été	1571	196	111,2	7553	4,81	21	21	21
Aut.	1685	196	126,8	7553	4,48	11	8	7

Note : l'échantillonnage à l'affluent ne permet pas de distinguer les variations saisonnières pour la charge

Les valeurs obtenues pour l'enlèvement de la DBO₅ sont comparées aux performances observées sur une base saisonnière en 2007 et 2008. Les années antérieures ne sont pas considérées car les températures ne sont pas disponibles entre 2003 et 2005.

Tableau H.3 Performance calculée et observée pour l'enlèvement de la DBO₅ (2007-2008)

	2007				2008			
	Variante 3		Observé		Variante 3		Observé	
	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (kg/d)
Hiver	16,0	24,7	18,2	28,5	16,4	26,1	12,8	20,3
Print.	7,7	13,4	6,0	11,4	8,9	17,6	6,7	12,6
Été	3,8	5,2	3,5	4,8	5,0	8,4	6,6	11,0
Aut.	11,1	17,4	5,3	8,3	11,0	17,1	9,4	14,7

Comme les résultats obtenus à l'aide de la variante 3 du modèle sont représentatifs de la performance réelle, cette variante est utilisée au chapitre 7 lors du dimensionnement des options envisagées pour la modernisation du SMAEU.

À partir de la quantité d'alun consommée par année, l'enlèvement de phosphore observé est comparé au tableau H.2 à celui proposé dans la littérature selon le rapport Al:P [MDDEP, 2010b]. L'alun est utilisé sous la forme d'une solution concentrée à 48,5%, avec 0,65kg d'alun par litre et 9,1% massique d'aluminium dans l'alun (Al₂(SO₄)₃•18H₂O).

Tableau H.4 Enlèvement du phosphore et rapport massique Al:P

Année	Qmoy (m ³ /d)	Charge P _T (kg/d)	Alun (L/d)	Al (kg/d)	Rapport Al:P	Observé (%)	Prévu (%)
2004	1451	6,7	172	10,2	1,52	80	85
2005	1563	6,7	167	9,9	1,48	84	85
2006	1676	6,7	193	11,4	1,78	82	90
2007	1486	6,7	188	11,1	1,66	78	87
2008	1645	6,7	156	9,2	1,37	82	81

Le rapport Al:P varie entre 1,4 et 1,8 avec un taux d'enlèvement du phosphore se situant entre 78% et 84%, ce qui est semblable à ce qui est mentionné dans la littérature. Ces dernières valeurs sont toutefois présentées à titre indicatif, car l'enlèvement réel du phosphore dépend de l'importance des réactions compétitives. Celles-ci sont notamment influencées par le pH, l'alcalinité, les éléments traces, les ligands, etc. [Metcalf & Eddy, 2003]. De plus, comme le mélange de l'alun se fait par barbotage dans une conduite entre les deux étangs, les conditions optimales de mélange et de floculation ne sont peut-être pas respectées en tout temps.

H.3 Teneur en contaminants chimiques dans les boues

Contaminant	Étang 1 (mg/kg, base sèche)	Teneur limite C1 (mg/kg, base sèche)	Teneur limite C2 (mg/kg, base sèche)
Arsenic	19,2	13	41
Cobalt	65	34	150
Chrome	35	210	1060
Cuivre	1040	400	1500
Molybdène	4,4	5	20
Nickel	32	62	180
Sélénium	<1,2	2,0	25
Zinc	539	700	1850
Cadmium	3,4	3,0	10
Mercure	1,3	0,8	4
Plomb	150	150	300
Dioxines et furanes	n.d.	17	50

H.4 Accumulation des boues

Bilan de masse	Coefficients	Équations	Références
Matières à l'affluent	DBO ₅ : 162kg/d MES _a : 222kg/d	$MES = MVS + MFS$ $MVS = 0,8(MES)$ $MVS = MVS_b + MVS_{nb}$ $MVS_b = 0,7(MVS)$	Metcalf & Eddy [2003]
Enlèvement de la DBO ₅	Voir section 6.3.2	$S_e = S_o \left(\frac{1}{1 + K_d t} \right) F.C.$	MDDEP [2010a]
Production de boues organiques	Y : 0,6gMVS/gDBO ₅ f _d : 0,1	$P_{X,MVS} = X_a + X_i + MVS_{nb}$ $X_a = \frac{QY(S_o - S_e)}{1 + k_d(V/Q)}$ $X_i = \frac{f_d k_d QY(S_o - S_e)}{1 + k_d(V/Q)}$ $k_d = 0,12(1,04)^{T-20}$ Où : P _{X,vss} : Boues organiques (kgMVS/d) X _i : Matières volatiles inertes (kgMVS/d) Y : Rendement cellulaire f _d : Fraction inerte de la biomasse k _d : taux de dégradation endogène (1/d)	Metcalf & Eddy [2003]
Production de boues inorganiques		$P_{X,MES} = \frac{X_a}{0,9} + \frac{X_i}{0,9} + MVS_{nb} + (MES_a - MVS_a)$	Metcalf & Eddy [2003]
Décomposition des boues		$B_1 = 15(1,07)^{T-20}$ $B_2 = 25(1,39)^{T-20}, \text{ pour } T > 15$ Où : B ₁ : taux de stabilisation aérobie (g/m ² .d) B ₂ : taux de stabilisation anaérobie (g/m ² .d) T : température des boues (°C)	Rich [1999] Note : les taux ont été ajustés selon l'accumulation observée des boues
Matières à l'effluent	MES : 26kg/d	$MVS = 0,9(MES)$	Metcalf & Eddy [2003]

ANNEXE I - AECV (SMAEU EXISTANT)

I.1 Inventaire de production

Construction du réseau

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Frais contingents	2 218 002 \$	\$US98			75
Construction, poste de pompage	12	p	3,6	p	75
Construction, génératrice	12	p	0,0312	p	20
Conduite, égout gravitaire	34197	m			75
Conduite, refoulement	11236	m			75
Conduite, égout sous vide	4341	m			75
Conduite, branchement gravitaire	35743	m			75
Conduite, branchement basse pression	7800	m			75
Conduite, branchement sous vide	3162,5	m			75
Purgeurs d'air	26	p			20
Vannes 150mm	14	p			75
Vannes 100mm	18	p			75
Regards	383	p			75
Unités de branchement sans arrêt de distribution	1603	p			75
Unités de branchement avec arrêt de distribution	100	p			75
Poste basse pression	200	p			75
Câble électrique	3129	m			75
Poste sous vide	140	p			75
Nettoyage et inspection	69 564 \$	\$US98			75
Travaux d'excavation, d'étañonnement, etc.	101 166 \$	\$US98			75
Travaux de structure, architecture et métaux	130	m ²			75
Travaux de méc. de pomp. (vannes, tuy., réserv.)	97 497 \$	\$US98			75
Travaux de méc. de pomp. (pompes vac., pompes ref.)	87 830 \$	\$US98			20
Travaux d'électricité	46 487 \$	\$US98			75
Travaux de mécanique et ventilation	26 484 \$	\$US98			75
Aménagement et chemin d'accès	3 826 \$	\$US98			75

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite, égout gravitaire</i>	1	m
Excavation	4,1	m ³
Remblai	1,85	m ³
Compaction	29,4	m ²
Sable (production)	270	kg
Gravier (production)	1100	kg
PVC (production)	7,84	kg
PVC (fabrication)	7,84	kg
Sable (transport)	8100	kg.km
Gravier (transport)	33000	kg.km
PVC (transport)	2352,41	kg.km
Déblai (à transporter)	2360	kg
Déblai (transport)	11800	kg.km
Transport (total)	55252,41	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite, refoulement</i>	1	m
Excavation	4,1	m ³
Remblai	1,85	m ³
Compaction	29,4	m ²
Sable (production)	270	kg
Gravier (production)	1100	kg
PVC (production)	5,06	kg
PVC (fabrication)	5,06	kg
Sable (transport)	8100	kg.km
Gravier (transport)	33000	kg.km
PVC (transport)	1518,07	kg.km
Déblai (à transporter)	2360	kg
Déblai (transport)	11800	kg.km
Transport (total)	54418,07	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite, égout sous vide</i>	1	m
Excavation	4,1	m ³
Remblai	1,85	m ³
Compaction	29,4	m ²
Sable (production)	270	kg
Gravier (production)	1100	kg
PVC (production)	3,26	kg
PVC (fabrication)	3,26	kg
Sable (transport)	8100	kg.km
Gravier (transport)	33000	kg.km
PVC (transport)	978,92	kg.km
Déblai (à transporter)	2360	kg
Déblai (transport)	11800	kg.km
Transport (total)	53878,92	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite, branchement gravitaire</i>	1	m
Excavation	2,85	m ³
Remblai	2,85	m ³
Compaction	4,95	m ²
Sable (production)	225	kg
Gravier (production)	473	kg
PVC (production)	3,26	kg
PVC (fabrication)	3,26	kg
Sable (transport)	6750	kg.km
Gravier (transport)	14190	kg.km
PVC (transport)	978,92	kg.km
Déblai (à transporter)	272	kg
Déblai (transport)	1360	kg.km
Transport (total)	23278,92	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite, branchement basse pression</i>	1	m
Excavation	3,05	m ³
Remblai	3,05	m ³
Compaction	5,25	m ²
Sable (production)	243	kg
Gravier (production)	561	kg
PVC (production)	0,38	kg
PVC (fabrication)	0,38	kg
Sable (transport)	7290	kg.km
Gravier (transport)	16830	kg.km
PVC (transport)	113,86	kg.km
Déblai (à transporter)	361	kg
Déblai (transport)	1805	kg.km
Transport (total)	26038,86	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Poste basse pression (RIVCO - Hydromatic)</i>	1	p
Pompe broyeuse	1	p
Panneau électrique	4,89	kg
Bassin en fibre de verre	53	kg
Tuyauterie et chaines en acier inoxydable	8,4	kg
Extrusion de l'acier inoxydable	8,4	kg
Tuyauterie en laiton	0,7	kg
Mise en forme du laiton	0,7	kg
Connection en acier	1	kg
Mise en forme de l'acier	1	kg
Composantes en plastique (polypropylène)	3,5	kg
Moulage du plastique	3,5	kg
Béton	300	kg
Transport des composantes	30446,06	kg.km
Transport des postes	86872,76	kg.km
Transport (total)	177318,82	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Purgeur d'air</i>	1	p
Acier inoxydable	6,79	kg
Fonte	20,36	kg
Bronze	5,01	kg
Mise en forme de l'acier inoxydable	6,79	kg
Mise en forme de la fonte	20,36	kg
Mise en forme du bronze	5,01	kg
Transport des matériaux	9647,80	kg.km
Transport du purgeur d'air	25727,46	kg.km
Transport (total)	35375,25	kg.km

Item	Quantité	Unité
Vanne 150mm	1	p
Fonte	51	kg
Bronze	2	kg
Résine epoxy	4	kg
EPDM	1	kg
Mise en forme de l'acier	51	kg
Mise en forme du bronze	2	kg
Transport des matériaux	17400	kg.km
Transport de la vanne	46400	kg.km
Transport (total)	63800	kg.km

Item	Quantité	Unité
Vanne 100mm	1	p
Fonte	33	kg
Bronze	2	kg
Résine epoxy	3	kg
EPDM	0,5	kg
Mise en forme de l'acier	33	kg
Mise en forme du bronze	2	kg
Transport des matériaux	11550	kg.km
Transport de la vanne	30800	kg.km
Transport (total)	42350	kg.km

Item	Quantité	Unité
Unité de branchement (avec arrêt de distribution)	1	p
Fonte	13,2	kg
Laiton	0,6	kg
Mise en forme de l'acier	13,2	kg
Mise en forme du laiton	0,6	kg
Transport des matériaux	4140	kg.km
Transport de l'unité	11040	kg.km
Transport (total)	15180	kg.km

Item	Quantité	Unité
Unité de branchement (sans arrêt de distribution)	1	p
Laiton	0,6	kg
Mise en forme du laiton	0,6	kg
Transport des matériaux	180	kg.km
Transport de l'unité	480	kg.km
Transport (total)	660	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite, branchement sous vide</i>	1	m
Excavation	3,05	m ³
Remblai	3,05	m ³
Compaction	5,25	m ²
Sable (production)	243	kg
Gravier (production)	561	kg
PVC (production)	3,90	kg
PVC (fabrication)	3,90	kg
Sable (transport)	7290	kg.km
Gravier (transport)	16830	kg.km
PVC (transport)	1168,67	kg.km
Déblai (à transporter)	361	kg
Déblai (transport)	1805	kg.km
Transport (total)	27093,67	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Poste sous vide (Busch - AIRVAC)</i>	1	p
Vanne d'interface (ABS)	31,5	kg
Tuyauterie interne (PVC)	2	kg
Plastique (production - moulage par injection)	33,5	kg
Vanne d'interface (acier inoxydable)	0,75	kg
Acier inoxydable (production inconnue)	0,75	kg
Puits de captage (fibre de verre)	90,5	kg
Couvert et joint (cast iron)	86	kg
Acier (production inconnue)	86	kg
Transport des composantes	63224,3	kg.km
Transport des postes	168598,2	kg.km
Transport (total)	231822,5	kg.km

* Inclus le remplacement de la vanne d'interface (75/20 * 8,4kg et 75/20 * 0,2kg)

Item	Quantité	Unité
<i>Regard (PCS - BSC)</i>	1	p
Béton	4690	kg
Armature (acier)	50	kg
Production de l'armature	50	kg
Couvercle et cadre (fonte ductile)	260	kg
Production du couvercle et du cadre	260	kg
Escalier (acier galvanisé)	10	kg
Transport des composantes	236700	kg.km
Transport des regards	159600	kg.km
Transport (total)	396300	kg.km

*Treillis d'armature selon norme NQ-2622-420

Construction de la station

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Frais incidents	226 151 \$	\$US98			75
Conduite, égout gravitaire	200	m			75
Excavation des étangs	34544	m ³			75
Remblayage (endiguement, enrochement, argile, etc.)	21719	m ³			75
Imperméabilisation des étangs (argile)	8455	m ³	20291765	kg	75
Transport de l'argile	608753	t.km			75
Contournement du ruisseau	130	m			75
Membrane géotextile	16714	m ²			75
Gravier (enrochement)	664	m ³	1461490	kg	75
Transport du gravier	43844,71	t.km			75
Compaction	33428	m ²			75
Matériau de déblai	20495	m ³	32791843	kg	75
Transport du matériau de déblai	983755,29	t.km			75
Conduites entre les regards (égout gravitaire)	250	m			75
Conduite aération inox. 200mm	46	m			75
Conduite aération inox. 150mm	82	m			75
Conduite aération inox. 125mm	16	m			75
Conduite aération inox. 100mm	64	m			75
Conduite aération galv. 75mm	280	m			75
Conduite aération HDPE 75mm	960	m			75
Supports d'alignement	9	p			75
Supports à rouleau	22	p			75
Conduite alun PVC 75mm	130	m			75
Émissaire (égout gravitaire)	500	m			75
Membrane flottante	255	m ²			75
Aérateurs	106	p			75
Conduite, branchement gravitaire	9	m			75
Utilisation du sol (transformation)	40000	m ²			75
Regards	8	p			75
Clôture	9 937 \$	\$US98	4 300,21 \$	\$US98	75
Travaux d'électricité	33 095 \$	\$US98	16 149,44 \$	\$US98	75
Alimentation en eau	6 181 \$	\$US98	1 636,04 \$	\$US98	75
Déboisement	10 538 \$	\$US98			75
Voies de circulation	42 153 \$	\$US98	30 610,75 \$	\$US98	75
Engazonnement	7 008 \$	\$US98			75
Agrandissement du bâtiment	110	m ²			75
Mécanique du bâtiment	7 670 \$	\$US98	28 763,84 \$	\$US98	20
Vannes	20	p			75
Drainage	22 657 \$	\$US98			75
Gaine pour conduite d'alun	3 409 \$	\$US98	693,18 \$	\$US98	75
Suppresseur et moteur	3	p			20
Système de dosage d'alun (tuy. + rés.)	28 980 \$	\$US98	16 066,02 \$	\$US98	75
Système de dosage d'alun (pompes)	3 505 \$	\$US99	13 144,93 \$	\$US98	20
Équipement de laboratoire	13 752 \$	\$US98	51 570,95 \$	\$US98	20
Débitmètres (racc. + cont.)	11 592 \$	\$US98			75
Débitmètres (équipements)	9 064 \$	\$US99	33 991,40 \$	\$US99	20
Pompe de vidage	6 514 \$	\$US98	24 427,65 \$	\$US98	20
Autres travaux	10 770 \$	\$US98			75
Transport (total)	1636353	t.km			75

Item	Quantité	Unité
<i>Aérateur (Premier Tech)</i>	1	p
Plastique (production)	7	kg
Plastique (fabrication)	7	kg
Béton armé	165	kg
Transport des aérateurs	7050	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Membrane géotextile</i>	1	m ²
Plastique (production) PP	0,13	kg
Plastique (fabrication) extrusion	0,13	kg
Transport de la membrane	37,95	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Membrane flottante</i>	1	m ²
Tissu (production) polyethylene teraphtalate	0,22	kg
Revêtement (production) EVA copolymer	1	kg
Membrane (fabrication) coextrusion	1,22	kg
Flotteur (production) PVC foam	2	kg
Flotteur (fabrication) extrusion	2	kg
Ancrages (béton)	10	kg
Transport de la membrane	5576	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite aération inox. 200mm</i>	1	m
Acier inoxydable	42,2	kg
Acier inoxydable (extrusion)	42,2	kg
Transport de la conduite	12660	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite aération inox. 150mm</i>	1	m
Acier inoxydable	28,1	kg
Acier inoxydable (extrusion)	28,1	kg
Transport de la conduite	8430	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite aération inox. 125mm</i>	1	m
Acier inoxydable	21,7	kg
Acier inoxydable (extrusion)	21,7	kg
Transport de la conduite	6510	kg.km

Item	Quantité	Unité
<i>Conduite aération inox. 100mm</i>	1	m
Acier inoxydable	16	kg
Acier inoxydable (extrusion)	16	kg
Transport de la conduite	4800	kg.km

Item	Quantité	Unité
------	----------	-------

Conduite aération galv. 75mm	1	m
Acier galvanisé	11,2	kg
Acier galvanisé (extrusion)	11,2	kg
Transport de la conduite	3360	kg.km

Item	Quantité	Unité
Conduite aération HDPE 75mm	1	m
HDPE	0,67	kg
HDPE (extrusion)	0,67	kg
Transport de la conduite	202,41	kg.km

Item	Quantité	Unité
Conduite alun PVC 75mm	1	m
PVC	0,67	kg
PVC (extrusion)	0,67	kg
Transport de la conduite	202,41	kg.km

Item	Quantité	Unité
Supports d'alignement	1	p
Béton armé	930	kg
Transport du support	27900	kg.km

Item	Quantité	Unité
Supports à rouleau	1	p
Béton armé	200	kg
Acier galvanisé	4	kg
Acier galvanisé (mise en forme)	4	kg
Transport du support	9200	kg.km

Item	Quantité	Unité
Contournement du ruisseau	1	m
Excavation	4	m ³
Remblai	3	m ³
Gravier (production)	6600	kg
Gravier (transport)	198000	kg.km
Déblai (à transporter)	4800	kg
Déblai (transport)	24000	kg.km
Membrane géotextile	8,5	m ²
Transport (total)	222000	kg.km

Item	Quantité	Unité
Suppresseur (AERZEN) et moteur (WEG)	1	p
Acier inoxydable	60	kg
Fonte	300	kg
Moteur électrique	500	kg
Mise en forme de l'acier	360	kg
Transport des matériaux	108000	kg.km
Transport du surpresseur et du moteur	688000	kg.km
Transport (total)	796000,00	kg.km

Opération et entretien du réseau

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
------	----------	-------	------------	-------	-------

Électricité	545943	kWh			1
Énergie produite par une génératrice diesel	4000	kWh			1
<i>Nettoyage de poste basse pression</i>	200	p			1
<i>Remplacement des pompes basse pression</i>	7,33	p			1
P.P. Télémétrie	4 867 \$	\$US98			1
P.P. Entretien bâtiment	607 \$	\$US98			1
P.P. Location outillage	6 963 \$	\$US98			1
P.P. Matériaux - électrique	773 \$	\$US98			1
P.P. Matériaux - pompes + gén.	7 591 \$	\$US98			1
P.P. Matériaux - vacuum	2 731 \$	\$US98			1
Remplacement des génératrices	0,44	p			1
Remplacement des purgeurs d'air	0,9533	p			1
Inspection regards	534 \$	\$US98			1
Réparations (regards, conduites, raccordements)	6 906 \$	\$US98			1
Inspection TV	599 \$	\$US98			1
Transport des pompes basse pression	217678	kg.km			1

*Remplacement des pompes inclus dans la construction des postes de pompage

*Entretien du bâtiment inclus dans la construction du bâtiment

Débordements

Émissions	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
DCO	185	kg			1
MES	103	kg			1
Pt	2,3	kg			1
NH4	9	kg			1

Opération et entretien de la station

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Alun	19930,3	kg			1
Alun (transport)	5979096	kg.km			1
Électricité	270476	kWh			1
Location véhicules et outils	360 \$	\$US98			1
Entretien électrique	266 \$	\$US98			1
Laboratoire	1 474 \$	\$US98			1
Entretien des bâtiments	1 120 \$	\$US98			1
Entretien du terrain	776 \$	\$US98			1
Mesure des boues	676 \$	\$US98			1
Remplacement, pompes du dosage d'alun	129 \$	\$US98			1
Remplacement, surpresseurs et moteurs	0,11	p			1
Remplacement, pompe de vidange	239 \$	\$US98			1
Vidange des boues	0,12	p			15

* Entretien du bâtiment inclus dans la construction du bâtiment

Item	Quantité	Unité
<i>Vidange des boues</i>	1	p

Énergie consommée par une génératrice diesel	7500	MJ
Polymère (Organopol/polyacrylamide) (acylic acid)	440	kg
Transport	35604,65	t.km
Enfouissement des boues*	440	t

*25% de siccité

Émissions atmosphériques

Émissions	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
CO2	123885	kg			1
CH4	4300	kg			1
NH4	3557	kg			1
N2O	3,19	kg			1

Fin de vie

Réseau (excluant les métaux)

Item	Quantité	Unité	Masse	Unité
Poste de pompage (granulat)	4,6	p	2465002,0	kg
Poste de pompage (pêles-mêles)	4,6	p	6842,1	kg
Plastique (conduites, égout gravitaire)	34197	m	268149,2	kg
Plastique (conduites, refoulement)	11236	m	56858,4	kg
Plastique (conduites, sous vide)	4341	m	14166,1	kg
Plastique (conduites, branchement basse pression)	7800	m	2960,3	kg
Plastique (conduites, branchement gravitaire)	35743	m	116632,4	kg
Plastique (conduites, branchement sous vide)	3163	m	12319,8	kg
Regards	383	p	1814657,6	kg
Poste basse pression (granulat)	200	p	480000,0	kg
Poste basse pression (pêles-mêles)	200	p	12280,0	kg
Cable électrique	3129	m	3254,2	kg
Poste sous vide (pêles-mêles)	140	p	17360,0	kg
Bâtiment (granulat et bois)	130	m ²	99216,0	kg
Bâtiment (pêles-mêles)	130	m ²	10699,0	kg
Pompes de poste à basse pression (pêles-mêles)	750	p	3573,0	kg

Total (granulat et bois)			4858875,6	kg
Total (pêles-mêles)			525094,4	kg

Station (excluant les métaux)

Item	Quantité	Unité	Masse	Unité
Plastique (conduites, égout gravitaire)	950	m	7449,29719	kg
Remblayage des étangs	36000	m ³	0	kg
Membrane géotextile	16714	m ²	2114,42128	kg
HDPE (conduite d'aération)	960	m	647,710843	kg
Supports d'alignement	9	p	8370	kg
Supports à rouleau (granulat)	22	p	4400	kg
PVC (conduite d'alun)	130	kg	87,7108434	kg
Membrane flottante (granulat)	255	m ²	2448	kg
Membrane flottante (pèle-mêle)	255	m ²	821,1	kg
Aérateurs	106	p	17490	kg
Aérateurs	106	p	742	kg
Regards	8	p	37920,0	kg
Bâtiment (granulat et bois)	110	m ²	83952,0	kg
Bâtiment (pèle-mêle)	110	m ²	9053,0	kg

Total (granulat et bois)			154580,0	kg
Total (pèle-mêle)			20915,2	kg

I.2 Émissions atmosphériques

Tableau I.1 – Modélisation des émissions atmosphériques carbonées

Bilan de masse	Coefficients	Équations	Références
Carbone entrant à l'affluent	DBO ₅ : 162kg/d MES ₃ : 222kg/d	$DBO_5/COT = 1,35$ $COT_b = 0,7(COT)$ Où : COT : Carbone organique total (mgC/L) COT _b : COT biodégradable (mgC/L)	Metcalf & Eddy [2003]
Enlèvement de la DBO ₅	Voir section 6.3.2	$S_e = S_o \left(\frac{1}{1 + K_d t} \right) F.C.$	MDDEP [2010a]
Émissions de CO ₂ dues à la dégradation de la DBO ₅		$R_o = Q(S_o - S_e) - 1,42X_a$ $P_{CO_2} = 1,1R_o$ Où : R _o : Consommation d'oxygène X _a : Biomasse (kgMVS/d) P _{CO₂} : Production de CO ₂	Metcalf & Eddy [2003] Monteith et al. [2005]
Production de boues organiques	Y : 0,6gMVS/gDBO ₅ f _d : 0,1	$P_{X,MVS} = X_a + X_i$ $X_a = \frac{QY(S_o - S_e)}{1 + k_d(V/Q)}$ $X_i = \frac{f_d k_d QY(S_o - S_e)}{1 + k_d(V/Q)}$ $k_d = 0,12(1,04)^{T-20}$ Où : P _{X,vss} : Boues organiques (kgMVS/d) X _i : Matières volatiles inertes (kgMVS/d) Y : Rendement cellulaire f _d : Fraction inerte de la biomasse k _d : taux de dégradation endogène (1/d)	Metcalf & Eddy [2003]
Décomposition des boues		$B_1 = 15(1,07)^{T-20}$ $B_2 = 25(1,39)^{T-20}, \text{ pour } T > 15$ Où : B ₁ : taux de stabilisation aérobie (g/m ² .d) B ₂ : taux de stabilisation anaérobie (g/m ² .d) T : température des boues (°C)	Rich [1999] Note : les taux ont été ajustés selon l'accumulation observée des boues
Carbone sortant à l'effluent	DBO ₅ : 18,2kg/d (moyenne annuelle)	$DBO_5/COT = 1$	Doka [2007]
Émissions de CO ₂ dues à la décomposition des boues		Digestion aérobie : 1,95kgCO ₂ /kgMVS Digestion anaérobie : 0,97kgCO ₂ /kgMVS 0,35kgCH ₄ /kgMVS	Metcalf & Eddy [2003]

Tableau I.2 - Modélisation des émissions atmosphériques azotées

Bilan de masse	Coefficients	Équations	Références
Azote entrant à l'affluent	NTK: 41,7kg/d	$NH_4/NTK = 0,6$ $N_{org}/NTK = 0,4$ Où : NH_4 : Azote ammoniacal total (mgN/L) N_{org} : Azote organique (mgN/L) NTK : Azote total Kjeldhal (mgN/L)	Metcalf & Eddy [2003]
Azote organique non-biodégradable à l'effluent		$N_{org-nb}/NTK = 0,03$ N_{org} : Azote organique non-biodégradable à l'effluent (mgN/L)	Metcalf & Eddy [2003]
Protoxyde d'azote généré en période de nitrification		$N_2O/NTK = 0,0006$ N_2O : Protoxyde d'azote émis à l'atmosphère (mgN/L)	Ahn et al. [2010]

1.3 Méthodes d'évaluation des impacts

Tableau I.3 – Catégories d'impact considérées dans la méthode ReCiPe

Catégories d'impact intermédiaires	Substance de référence	Catégories d'impact des dommages	Unité de dommage
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11	Santé humaine	<i>Disability adjusted life year (DALY)</i> (année)
Toxicité humaine	kg 1,4-DCB		
Radiations ionisantes	kg U ²³⁵		
Formation de photo-oxydants	kg COVNM		
Formation de particules fines	kg PM ₁₀		
Changements climatiques	kg CO ₂		
Écotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	Écosystèmes	<i>Potentially disappearing fraction (PDF)</i> (espèce.année)
Acidification terrestre	kg SO ₂		
Occupation du sol agricole	m ² .an		
Occupation du sol urbain	m ² .an		
Transformation des espaces naturels	m ² .an		
Écotoxicité marine	kg 1,4-DCB		
Eutrophisation en eau douce	kg P		
Écotoxicité en eau douce	kg 1,4-DCB		
Eutrophisation marine	kg N	Aucune catégorie	
Consommation des carburants fossiles	kg pétrole	Ressources	Coût additionnel (\$)
Consommation des minéraux	kg fer		
Consommation de l'eau	m ³ eau	Aucune catégorie	

Tableau I.4 – Catégories d'impact considérées dans la méthode TRACI2

Catégories d'impact intermédiaires	Substance de référence
Changements climatiques	kg CO ₂
Acidification terrestre	moles H ⁺
Santé humaine – substances cancérigènes	kg benzène
Santé humaine – substances non cancérigènes	kg toluène
Santé humaine – effets respiratoires	kg PM _{2,5}
Eutrophisation	kg CFC-11
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11
Écotoxicité	kg 2,4-D
Formation de photo-oxydants	g NO _x

I.4 Évaluation des impacts avec TRACI 2

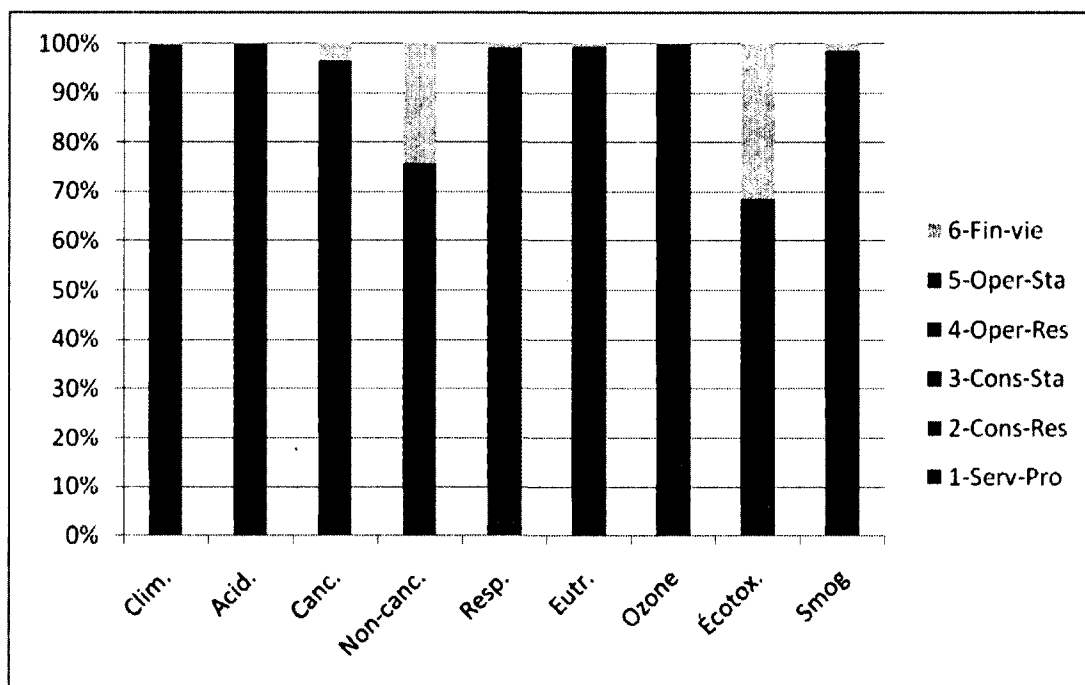


Figure I.1 - Impact normalisés pour le SMAEU selon la méthode TRACI2

Les résultats concordent avec ceux obtenus avec la méthode ReCiPe, la phase d'opération étant celle ayant le plus grand impact selon l'ensemble des catégories d'impact. Les principaux processus contributeurs sont les mêmes que ceux identifiés précédemment (production d'électricité, émissions atmosphériques à la station et mise en place des conduites). Tel qu'estimé avec ReCiPe, les phases de conception et de fin de vie sont marginales selon la plupart des catégories d'impact. La fin de vie semble toutefois associée à un impact non négligeable sur la santé humaine (substances non cancérogènes) et l'écotoxicité. Ces impacts seraient générés lors de l'enfouissement des matières résiduelles issues du démantèlement du SMAEU (regards, conduites, équipements, etc.).

ANNEXE J – ACCV (SMAEU EXISTANT)

Construction du réseau (tous les coûts en dollars constants de 2008)

Travaux municipaux

Lot (année)	Travaux de construction	Frais incidents
Lot 0 (1979)	3 699 000\$	911 000\$
Lot 1 (1989)	611 000\$	131 000\$
Lot 5 (1989)	1 984 000\$	380 000\$
Lot 6 (1989)	1 337 000\$	253 000\$
Lot 7 (1989)	3 445 000\$	647 000\$
Lot 8 (1994)	424 000\$	106 000\$
Lot 9 (2005)	338 000\$	68 000\$

Interception

Lot (année)	Travaux de construction	Frais incidents
Lot 0 (1979)	1 492 000\$	349 000\$
Lot 1 (1989)	668 000\$	137 000\$
Lot 3 (1989)	258 000\$	49 000\$
Lot 5 (1989)	624 000\$	117 000\$
Lot 6 (1989)	692 000\$	130 000\$
Lot 7 (1989)	999 000\$	188 000\$
Lot 8 (1994)	145 000\$	33 000\$
Lot 9 (2005)	906 000\$	170 000\$

Traitement

Lot (année)	Travaux de construction	Frais incidents
Lot 0 (1979)	85 000\$	63 000\$
Lot 1 (1989)	447 000\$	96 000\$
Lot 5 (1989)	146 000\$	31 000\$

Construction de la station (tous les coûts en dollars constants de 2008)

Lot (année)	Travaux de construction	Frais incidents
Lot 4 (1989)	1 829 000\$	393 000\$

Opération et entretien du réseau (tous les coûts en dollars constants de 2008)

Opération (électricité)	Opération. (autres)	Entretien (annuel)	Entretien (20 ans)
52 000\$	103 000\$	64 000\$	581 000\$

Opération et entretien de la station (tous les coûts en dollars constants de 2008)

Opération (électricité)	Opération. (autres)	Entretien (annuel)	Entretien (20 ans)
23 000\$	18 000\$	3 000\$	140 000\$

Fin de vie (tous les coûts en dollars constants de 2008)

Démantèlement (réseau)	Démantèlement (station)	Tri et élimination
891 000\$	320 000\$	134 000\$

ANNEXE K – ÉVALUATION MONÉTAIRE DES BIENS ET SERVICES ENVIRONNEMENTAUX

Les régressions linéaires multiples ont été réalisées avec le logiciel Microsoft Excel 2007.

Tableau K.1 Résultats de la régression linéaire pour la VDP

Variables	VDP collecte		VDP plans d'eau	
	Coefficient	<i>p</i>	Coefficient	<i>p</i>
Constante	8,84 (0,294)	0,771	-6,28 (-0,133)	0,895
Usage avec contact			1,01 (1,792)	0,075
Usage à proximité	0,063 (0,122)	0,904		
Scolarité	0,367 (0,304)	0,763	-2,061 (-1,067)	0,288
Âge	-0,111 (-0,519)	0,608	0,491 (1,36)	0,175
Profil environnemental	3,23 (0,433)	0,667	-0,218 (-0,016)	0,987
Revenu	2,24x10 ⁻⁵ (0,291)	0,773	0,000609 (3,62)	0,000
Nombre d'observations	32		145	
R ²	0,049		0,130	

Note : les valeurs entre parenthèses correspondent à la statistique-t.

Tableau K.2 Résultats de la régression linéaire pour le CAA

Variables	CAA collecte		CAA plans d'eau	
	Coefficient	<i>p</i>	Coefficient	<i>p</i>
Constante	80,7 (0,340)	0,734	-4,23 (-0,017)	0,987
Usage avec contact			0,636 (0,165)	0,870
Usage à proximité	2,62 (0,593)	0,554		
Scolarité	-8,166 (-0,852)	0,396	-4,349 (-0,395)	0,694
Âge	3,964 (2,198)	0,030	4,825 (2,496)	0,014
Profil environnemental	12,31 (0,178)	0,859	15,96 (0,217)	0,829
Revenu	0,000766 (0,939)	0,350	0,000570 (0,638)	0,525
Nombre d'observations	125		100	
R ²	0,051		0,065	

Note : les valeurs entre parenthèses correspondent à la statistique-t.

ANNEXE L – ANALYSE DISTRIBUTIONNELLE

Tableau L.1 Seuils d'imposition au Canada et au Québec en 2008

Canada			Québec	
Limite inférieure	Taux		Limite inférieure	Taux
9 600\$	12,5%		12 769\$	16%
37 885\$	18,4%		37 500\$	20%
75 769\$	21,7%		75 000\$	24%
123 184\$	24,2%			

Tableau L.2 Propension marginale à consommer (PmC) et consommation non taxable en 2008

Quintiles (limite inférieure)	PmC	Non taxable
1 ^{er} (0\$)	1	52,7%
2 ^e (23 000\$)	1	43,4%
3 ^e (38 000\$)	1	39,9%
4 ^e (57 000\$)	0,95	36,5%
5 ^e (89 000\$)	0,83	32,7%

Tableau L.3 Taxes à la consommation (TPS et TVQ) en 2008

TPS (Canada)	5%		TVQ (Québec)	7,88%
--------------	----	--	--------------	-------

Crédits d'impôts remboursables (TPS et TVQ)

Tableau L.4 Crédit d'impôt pour la TPS en 2008

Ménage	Seuil réduction	Seuil de sortie	Taux réd.	Crédit max.
Personne seule	31 524\$	38 904\$	5%	369\$
Famille monoparentale	31 524\$	43 744\$	5%	611\$
Couple sans enfant	31 524\$	41 205\$	5%	482\$
Couple un enfant	31 524\$	43 744\$	5%	611\$
Couple deux enfants ou plus	31 524\$	48 264\$	5%	738\$

Tableau L.5 Crédit d'impôt pour la TVQ en 2008

Ménage	Seuil réduction	Seuil de sortie	Taux réd.	Crédit max.
Personne seule	29 645\$	40 379\$	3%	292\$
Famille monoparentale	29 645\$	43 245\$	3%	348\$

ANNEXE M – ENJEUX DE DÉVELOPPEMENT DURABLE POUR LE SMAEU

M.1 Enjeux associés aux principes du développement durable

Principes	Enjeux
1- Préserver la biodiversité en considérant les impacts potentiels des projets sur leur cycle de vie	<p>Les équipements du SMAEU peuvent occuper un territoire non développé et ainsi détruire un habitat plus ou moins sensible.</p> <p>Les impacts indirects associés au cycle de vie du SMAEU (production des composantes, de l'électricité, etc.) peuvent aussi avoir un effet sur la biodiversité.</p> <p>Les SMAEU préservent la biodiversité dans les cours d'eau locaux car ils contribuent à la conservation des écosystèmes.</p>
2- Maintenir les impacts des projets dans la limite de la capacité de support des écosystèmes affectés	<p>Le cycle de vie des SMAEU est lié à divers impacts sur les écosystèmes, tout comme l'ensemble des produits et services.</p> <p>Les objectifs de rejet à l'effluent fixés par le gouvernement doivent permettre de respecter la capacité assimilatrice du milieu récepteur.</p> <p>D'autres sources de pollution contribuent à la dégradation des cours d'eau.</p>
3- Éviter d'utiliser des ressources non-renouvelables et respecter le taux de régénération des ressources renouvelables	<p>Plusieurs ressources non-renouvelables sont nécessaires pour la mise en place des SMAEU et leur opération (acier, plastique, diesel, alun, etc.).</p> <p>L'électricité produite au Québec est en grande majorité renouvelable (hydroélectricité).</p> <p>Les eaux usées sont une source potentielle d'énergie et de nutriments.</p>
4- Augmenter l'efficacité énergétique et matérielle des activités de production et de consommation	<p>Il est sans doute possible de cibler des processus inefficaces à chacune des étapes du cycle de vie d'un SMAEU.</p> <p>Pour l'opération du SMAEU, mentionnons le transport des eaux parasites, un transfert inefficace de l'oxygène lors de l'aération, un taux d'aération inutilement élevé, l'énergie perdue lors de la dégradation des boues d'étang, etc.</p>
5- Supporter l'innovation pour assurer la production continue de biens et services de qualité	<p>L'intégration d'éléments innovateurs ne se fait pas de manière systématique de projet en projet.</p> <p>L'opération des SMAEU ne fait pas nécessairement l'objet d'une amélioration continue.</p>
6- Vérifier que les bénéfices totaux générés sur le cycle de vie de projets surpassent les coûts encourus	<p>Les bénéfices associés aux SMAEU (protection des biens et services environnementaux et protection de la santé) ne sont pas quantifiés.</p> <p>Les coûts sur le cycle de vie des SMAEU (conception, financement, construction, opération, entretien, fin de vie) sont quantifiés partiellement.</p>
7- Considérer l'impact des projets sur le marché du travail et sur la qualité des emplois	<p>La conception et la construction des SMAEU génèrent des emplois directs et indirects.</p> <p>L'opération des SMAEU génèrent également des emplois dont la qualité est directement influencée par les choix faits lors de la conception.</p>
8- Distribuer de manière équitable les bénéfices et les coûts résultant des projets	<p>La distribution des bénéfices est affectée par plusieurs facteurs (localisation des propriétés, accès publics aux cours d'eau, emplois créés, etc.)</p> <p>La distribution des coûts associés aux SMAEU est aussi affectée par plusieurs facteurs (richesse des ménages, fiscalité municipale, provinciale et fédérale, etc.)</p>
9- S'assurer que les projets contribuent au développement des individus et communautés impliqués	<p>Les employés impliqués dans la conception, la construction ou l'opération du SMAEU peuvent avoir l'occasion de développer leurs compétences.</p> <p>Les SMAEU peuvent contribuer au développement du secteur des loisirs et du secteur touristique.</p>

10- Aider les clients à distinguer besoins et désirs pour viser un réel accroissement de la qualité de vie	Les SMAEU contribuent à satisfaire des besoins de base (salubrité) et influencent la qualité de vie des citoyens. Il n'est pas possible de tout envoyer dans le réseau de collecte.
11- Contribuer à un environnement sain et sécuritaire tout au long du cycle de vie des projets	L'opération des SMAEU peut occasionner des risques pour la santé humaine (exposition aux pathogènes, travail en espace clos, etc.) Les impacts indirects générés sur le cycle de vie (production des composantes, de l'électricité, etc.) peuvent aussi avoir des effets sur la santé humaine.
12- Diffuser l'information relative aux impacts des projets pour sensibiliser et responsabiliser	Les citoyens ne sont pas nécessairement conscients ou soucieux de l'influence de leurs comportements sur le fonctionnement du SMAEU. Les comportements des citoyens ont une influence majeure sur le fonctionnement des SMAEU (débits rejetés, substances rejetés, branchements illicites, etc.)
13- Appliquer le principe de précaution si un projet menace sérieusement la société ou l'environnement	La valorisation des boues extraites des SMAEU doit se faire selon un cadre strict permettant de prévenir l'accumulation de polluants persistants dans l'environnement.
14- Solliciter la participation de parties prenantes et d'autres professionnels pour en venir à des solutions holistiques	La conception de SMAEU peut intéresser de nombreuses parties prenantes. Il s'agit aussi d'un exercice multidisciplinaire. L'intérêt est plus marqué pour sa mise en place que pour son suivi ou sa modernisation (dans la mesure où les habitudes ne sont pas affectées).
15- Identifier, évaluer et internaliser les externalités lorsque le contexte le permet	Des coûts externes sont imposés aux citoyens lors du mauvais fonctionnement du système (débordements, odeurs, surverse, etc.) Certains coûts externes sont aussi associés aux émissions de GES ou d'autres polluants sur le cycle de vie.

M.2 Enjeux associés au cadre conceptuel sur le développement durable

Élément du cadre	Enjeux
Atmosphère	Émissions sur le cycle de vie de polluants atmosphériques. Odeurs associées à l'exploitation.
Hydrosphère	Consommation d'eau sur le cycle de vie. Émissions sur le cycle de vie de rejets aqueux (eaux de surface et eaux souterraines).
Lithosphère	Consommation des ressources abiotiques sur le cycle de vie.
Écosystèmes aquatiques	Impact de l'effluent et des débordements aux ouvrages de surverse. Impacts associés aux rejets atmosphériques, aqueux et au sol sur le cycle de vie.
Écosystèmes terrestres	Occupation du territoire par le SMAEU. Consommation de ressources biotiques sur le cycle de vie. Impacts associés aux rejets atmosphériques, aqueux et au sol sur le cycle de vie.
Individus	Besoins rencontrés (problèmes résolus) par le SMAEU. Opportunités d'emploi et conditions de travail (emplois directs et indirects). Développement professionnel ou développement des aptitudes associé aux emplois. Effets sur la santé humaine des émissions ou de la dégradation des services rendus par les écosystèmes. Effets sur la qualité de vie des émissions ou de la dégradation des services rendus par les écosystèmes.
Système agricole	Effet des aliments consommés sur les propriétés des eaux usées. Retour des nutriments et du carbone organique présents dans les eaux usées aux sols agricoles.
Système industriel	Matériaux, composantes, équipements, combustibles, etc. disponibles sur le marché et leurs caractéristiques respectives. Modes actuels de gestion en fin de vie pour les matériaux, composantes, équipements, combustibles, etc.
Système urbain	Interactions avec les autres infrastructures (eau potable, routes, électricité). Influence du mode d'occupation du territoire.
Systèmes de l'information	Équipement (débitmètres, sondes, etc.) ou procédures (analyses, comptabilité, gestion des plaintes, sondages, etc.) en place pour le suivi du système et type de données obtenues.
Système économique	Disponibilités des ressources et coûts associés. Allocation d'une partie des revenus de la Ville de Sherbrooke au SMAEU.
Système politique	Élaboration du mode de financement. Définition du périmètre d'urbanisation (territoire desservi par le SMAEU). Définition des conditions d'utilisation.
Système scientifique	Validation des technologies et évaluation des paramètres permettant leur dimensionnement. Évaluation de la capacité assimilatrice du milieu récepteur. Toutes autres connaissances relatives aux SMAEU de manière générale ou à la configuration d'un SMAEU en particulier.
Système des communications	Couverture (ou non) par les médias des enjeux relatifs au SMAEU. Influence de la couverture médiatique ou des informations transmises par les responsables sur les perceptions et les comportements des individus. Intérêt des parties prenantes pour les informations qui leur sont communiquées et désir de participer.
Système légal	Lois, règlements, codes, etc. associés au SMAEU. Capacité des institutions responsables à faire respecter les lois, règlements, etc.

Système éducationnel	Compétences (formation) des individus impliqués dans la conception, l'opération et la gestion du système. Transmission des savoirs propres au système entre les divers intervenants. Connaissances générales des citoyens (techniques pour les installations sur leur propriété, environnementales pour la justification du système).
Familles	Consommation d'eau potable dans les ménages. Comportements face à l'eau rejetée aux égouts.
Communautés	Perceptions vis-à-vis le SMAEU. Acceptabilité d'interventions sur le SMAEU (impacts sur les habitudes de vie ou impacts financiers).
Réseaux	Liens entre la Ville de Sherbrooke, les firmes de génie-conseil et les fournisseurs d'équipements pour les SMAEU. Liens entre les organisations de protection de l'environnement.
Organisations	Rôle, intérêts, influence des diverses organisations touchées de près ou de loin par le SMAEU.
Culture	Attitude et attentes face aux SMAEU et à leur configuration habituelle (aucune composante visible, aucune rétroaction sur l'impact des comportements par rapport au fonctionnement du système, absence de compteurs d'eau, etc.)
Sous-cultures	Émergence d'une sous-culture favorable à la « consommation responsable » et aux « maisons écologiques » plus ouverte à de nouvelles approches pour les SMAEU. Présence d'une sous-culture dans les arrondissements fusionnés à la Ville de Sherbrooke exprimant de la méfiance face à toute intervention de la Ville. Cynisme dans une certaine tranche de la population face aux services publics.

ANNEXE N – SOLUTIONS IDENTIFIÉES LORS DE SÉANCES DE CRÉATIVITÉ

N.1 Station d'épuration et traitement des boues

Concept	Limitations et inconvénients	Retenu
Enlèvement plus fréquent des boues pour assurer un volume suffisant.	Marge déjà prévu dans le guide du MDDEP.	
Augmenter la puissance des aérateurs ou l'efficacité de l'aération.	Gain en efficacité insuffisant.	
Entretien des abords des étangs (déboiser ou désherber).	Déjà fait.	
Augmenter la profondeur des étangs pour augmenter leur volume.	Non applicable	
Agrandir les étangs pour augmenter leur volume	Non applicable	
Ralentir l'écoulement dans les étangs pour augmenter le temps de rétention	Affecterait aussi le volume.	
Ajouter un étang		X
Mieux connaître le processus de transformation de l'azote dans les étangs pour éventuellement l'optimiser	Ajouter au suivi	
Bioaugmentation	Trop coûteux	
MBBR		X
Média immobile	Plus complexe que MBBR	
Couvrir les étangs aérés		
Augmenter l'infiltration d'eau dans les bassins d'épuration	Étanchéité requise	
Faire de la recirculation d'eaux usées à la station	Trop coûteux	
Faire pousser des plantes dans les étangs	Non applicable l'hiver	
Remplacer les étangs par des serres	Trop complexe	
Bassins d'évaporation au long du système	Non applicable en temps froid	
Filtration de l'eau à l'entrée de la station		
Congeler l'eau l'été pour la rejeter en période sèche	Trop énergivore	
Évaporer davantage d'eau à partir des étangs	Non applicable en temps froid	
Ajouter des petites stations d'épuration sur le territoire	Branchements additionnels répartis sur le territoire	
Vidanger les boues à chaque année	Gain marginal en efficacité	
Chauffer l'eau des étangs pour améliorer le rendement	Demande énergétique trop élevée	
Utiliser les boues ou les déchets locaux pour générer de l'énergie	Boues retirées périodiquement, valorisation énergétique peu répandue	
Installation de panneaux isolants conserver la chaleur des étangs		X

Concept	Limitations (systèmes périphériques)	Retenu
Enfouissement des boues aux 10-15 ans	Projet de règlement du Gouvernement du Québec visant à interdire l'enfouissement de la matière organique d'ici 2020	
Compostage des boues	Dépend des installations régionales	
Méthanisation des boues	Dépend des installations régionales	
Épandage direct des boues	Aucun dégrilleur, tamisage nécessaire lors du pompage	

N.2 Réseau de collecte

Concept	Limitations (systèmes périphériques)	Retenu
Éliminer les branchements de gouttières au réseau d'égouts sanitaire		X
Poser des couvercles hermétiques aux regards susceptibles d'être immergés	Déjà quelques cas, gain marginal	
Remplacement ou réhabilitation des sections du réseau plus âgées	Autres priorités selon le plan d'intervention de la VdeS	
Éliminer les branchements des drains de fondation au réseau d'égouts sanitaire		X
Installer des bassins de stockage aux postes de pompage	Ne règle pas le problème à la source	
Mettre des pompes plus puissantes	Tuyaux de petit diamètre	
Remplacement du réseau d'égouts	Réseau récent en majorité	
Étanchéisation des égouts sur tout le territoire	Autres priorités selon le plan d'intervention de la VdeS	
Reconstruire certaines sections du système de collecte des eaux usées	Autres priorités selon le plan d'intervention de la VdeS	
Ajouter un bassin avec des pompes plus puissantes dans les postes de pompage	Tuyaux de petit diamètre	
Utiliser des pompes plus efficaces pour augmenter le débit	Tuyaux de petit diamètre	
Isolation des tuyaux pour réduire la perte d'énergie	Trop complexe	
Alimenter les pompes avec de l'énergie locale	Barrages hydro à proximité	
Acheminer les eaux usées ailleurs qu'à la station d'épuration de Deauville	Stations adjacentes avec capacité limitée	
Soulager les secteurs du réseau aux prises avec des débordements	Secteurs au cœur du réseau	

N.3 Bâtiments

Concept	Limitations (systèmes périphériques)	Retenu
Rétention des eaux de pluie dans des barils	Option prévue dans le guide de la VdeS	
Installer des toilettes à faible débit dans toutes les résidences	Déjà en bonne proportion, consommation résidentielle faible	
Poser des pommes de douches à faible consommation	Déjà en bonne proportion, consommation résidentielle faible	
Utilisation des eaux grises pour les toilettes	Besoin de projet pilote, aucune motivation économique	
Subventionner le remplacement des équipements consommant beaucoup d'eau	Consommation résidentielle faible	
Séparer les eaux usées à la source	Besoin de projet pilote	
Changer les équipements consommant l'eau potable dans les ICI	Peu d'ICI en proportion	
Éliminer les rejets d'eaux pluviales		X
Capter et retenir les eaux pluviales par des toits verts	Terrains de dimension suffisante	
Réutiliser les eaux grises dans les résidences	Besoin de projet pilote, aucune motivation économique	
Utiliser les eaux pluviales pour les toilettes et le jardinage	Besoin de projet pilote, aucune motivation économique	
Séparer l'urine à la source	Besoin de projet pilote	
Interdiction des pompes submersibles branchées aux égouts		X
Incitatifs à la construction de puits percolant sur les terrains	Option prévue dans le guide de la VdeS	
Installation de fosses septiques chez les particuliers	Dépenses majeures pour les infrastructures en place	
Installation de toilettes à compost dans les établissements municipaux	Technologie non reconnue, besoin de projet pilote	
Éliminer les lave-vaisselles du territoire desservi	Consommation résidentielle faible	
Installer des compteurs d'eau	Option pour le suivi, impact marginal sur la consommation déjà faible	
Éliminer toutes les sources de captage	Cibler les plus importantes en premier	X
Empêcher l'apport de contaminants à la source pour améliorer la qualité des boues	Respect de la réglementation en place et sensibilisation	
Réduire les débits d'eau potable consommés	Consommation résidentielle faible	

N.4 Gestion du système

Concept	Limitations (systèmes périphériques)	Retenu
Installation de compteurs d'eau et tarification selon le coût total de l'eau	Dépend de la position de la VdeS, consommation résidentielle déjà faible.	
Accroître les campagnes de sensibilisation sur la consommation d'eau	Dépend des programmes de la VdeS, consommation résidentielle déjà faible.	
Abaisser les taxes municipales aux résidences mettant en œuvre une série d'intervention	Commencer par le respect de la réglementation en place.	
Mener une campagne d'information sur les gains amenés par les interventions dans les ménages	Doit accompagner toute intervention	X
Mettre en place une tarification par palier pour les services en eau	Dépend de la position de la VdeS, consommation résidentielle déjà faible.	
Imposer des exigences pour la consommation / séparation / branchements aux nouvelles résidences	Développement futur limité, s'assurer du respect de la réglementation en place.	
Donner un objectif de citoyen ou riverain vert aux résidents du secteur	Dépend de la position de la VdeS, consommation résidentielle déjà faible.	
Certification « verte » aux ménages le méritant donnant droit aux rabais de taxes foncières	Dépend de la position de la VdeS, consommation résidentielle déjà faible.	
Subventionner les interventions dans les résidences qui permettent d'améliorer le fonctionnement du système d'assainissement	S'assurer du respect de la réglementation en place.	
Financer le système d'assainissement entièrement par les tarifs	Dépend de la position de la VdeS et des paliers gouvernementaux supérieurs.	
Faciliter l'accès au support technique pour les citoyens désirant faire des interventions	Doit accompagner toute intervention	
Augmenter le prix de l'eau pour en réduire la consommation	Dépend de la position de la VdeS, consommation résidentielle déjà faible.	
Améliorer la surveillance lors de la réalisation des travaux (branchements des résidences) et effectuer périodiquement des vérifications	Doit accompagner toute intervention	
Ne pas négliger l'entretien du système	Déjà en place.	
Soutenir les programmes d'entretien préventif et l'amélioration continue	Dépend des priorités de la VdeS.	

N.5 Suivi du système et sensibilisation

Concept	Limitations (systèmes périphériques)	Retenu
Mener une enquête sur les utilisateurs commerciaux, industriels et commerciaux (consommation d'eau, production d'eaux usées, gestion des eaux pluviales, etc)	Doit accompagner toute intervention, le contexte a changé depuis 1988	
Tests de fumée dans les égouts pour identifier les sources d'eaux pluviales	Accompagne le respect de la réglementation en place	
Mieux documenter les occurrences de débordement pour toutes les stations de pompage	Dépend de la VdeS et des exigences du MAMROT	
Comparer les coûts nécessaires à la réfection et ceux des interventions permettant de réduire la consommation d'eau	Le plan d'intervention de la VdeS ne prévoit pas de travaux à court terme	
Rechercher la source de cuivre qui empêche la valorisation des boues par épandage	Semble provenir des tuyaux dans les maisons	

Concept	Limitations (systèmes périphériques)	Retenu
Utiliser les organismes communautaires (APLM, RAPPEL, autres groupes de citoyens) et les conseillers municipaux pour accélérer les changements	Doit accompagner toute intervention	
Donner le portrait de la situation (si pas déjà fait) aux Conseil municipal et au comité de développement durable de la Ville de Sherbrooke	Doit accompagner toute intervention	
Sensibilisation à ne pas rincer la vaisselle avant de la mettre au lave-vaisselle	Mentionner dans un programme de sensibilisation plus large	
Sensibiliser les jeunes aux niveaux primaire et secondaire en expliquant la problématique locale	Dépend des programmes d'éducation	
Sensibiliser les firmes de consultants	Dépend des appels d'offre émis par la VdeS	
Campagne de sensibilisation dans les écoles primaires et secondaires	Dépend des programmes d'éducation	
Former les opérateurs, techniciens	Requiert une formation professionnelle, doit accompagner toute intervention	

ANNEXE O – DIMENSIONNEMENT DES OPTIONS (RÉSEAU ET STATION)

O.1 Population actuelle et projetée

Sous-bassin	Actuel (2008)			Ajouts			Projeté		
	Rés.	ICI	Total	Rés.	ICI	Total	Rés.	ICI	Total
A	263	0	263	15	0	15	288	0	288
B	183	30	213	2	0	2	185	30	215
C	83	0	83	9	0	9	92	0	92
D	78	0	78	51	0	51	129	0	129
E	53	0	53	2	0	2	55	0	55
F	221	0	221	67	0	67	288	0	288
G	64	0	64	9	0	9	73	0	73
GA1	53	0	53	2	0	2	55	0	55
GA2	700	430	1130	45	45	90	745	475	1220
GB1	385	0	385	7	0	7	392	0	392
GB2	166	0	166	7	0	7	173	0	173
GB3	355	0	355	96	0	96	437	0	451
H	240	0	240	14	0	14	254	0	254
I	213	0	213	21	0	21	234	0	234
J	0	290	290	0	0	0	0	290	290
K	392	0	392	35	0	35	427	0	427
L	275	0	275	87	10	97	362	10	372
M	182	70	252	26	0	26	208	70	278
Total	3906	820	4726	562	55	536	4478	875	5286

O.2 Réseau A - Bassin de rétention

Outre le poste de pompage Dion, les postes de pompage des sous-bassins où le développement résidentiel sera concentré sont aussi susceptibles de voir leur capacité excédée. Pour chacun de ces sous-bassins, le débit installé est comparé au débit de pointe calculé à l'aide de l'équation O.1 [Brière, 2006]. Les résultats sont présentés au tableau O.1, avec un facteur de pointe égal à 4.

$$Q_p = Q_{am} + FP \cdot Q_{dom} + Q_{par} \quad (0.1)$$

Où :

Q_p : Débit de pointe au poste de pompage

Q_{am} : Débit de conception du poste de pompage en amont

FP : Facteur de pointe (4)

Q_{dom} : Débit domestique dans le sous-bassin

Q_{par} : Débit d'eaux usées parasites dans le sous-bassin

Tableau O.1 Vérification de la capacité des postes de pompage

Sous-bassin	Poste de pompage	Débit de pointe (m ³ /d)				Q installé* (m ³ /d)
		Q_{am}	$FP \cdot Q_{dom}$	Q_{par}	Q_p	
D	Trianon	439	349	68	853	847
GA2	Dion	847	1353	323	2523	2675
GB3	Perras	3456	361	61	3878	3974
K	Tellier	1109	342	67	1518	2207
L	Rodrigue	0	298	58	356	478

*Note : Les débits installés sont donnés dans la situation où une pompe sur deux (Trianon, Dion, Tellier et Rodrigue) ou une pompe sur trois (Perras) est en fonctionnement.

Le débit installé est supérieur au débit de pointe pour les postes de pompage Tellier, Dion, Perras et Rodrigue tandis qu'il est légèrement inférieur pour le poste Trianon. Cette situation avait été anticipée lors de la conception du SMAEU en 1988 et était considérée acceptable dans la mesure où une pompe supplémentaire pouvait être démarrée à ce poste de pompage sur une courte période de temps pour refouler le débit excédentaire.

O.3 Réseau B – Débranchement des drains de fondation

Les débits estimés sont présentés au tableau O.2. Pour les sous-bassins GA1 et GA2, où le réseau est plus âgé, le débit d'eaux parasites demeure plus élevé que dans les autres sous-bassins.

Tableau O.2 Débits estimés pour le débranchement des drains de fondation

Débit	Projeté		Conception		Typique	
	(L/p.d.)		(L/p.d.)	(m ³ /d)	(L/p.d.)	(m ³ /d)
Domestique	200	1057	200	1057	200	1057
Captage-d	5	27	5	27	5	27
Captage-i	21	111	11	58	11	58
Infiltration	130	533	60	246	94	386
Infiltration (GA)	171	202	101	120	135	160
Total		1930		1508		1688
Réduction (L/res.d)				653		375

Les valeurs obtenues de villes nord-américaines ayant mené des programmes de débranchement des drains de fondation sont énumérées au tableau O.3, accompagnées du taux de non conformité avant la mise en place de ces programmes.

Tableau O.3 Données sur les programmes de débranchements de gouttières recensés

Ville	Branchements non conformes	Méthode d'évaluation	Réduction (L/res.d)
New Brighton [Thorne, 2011]	10%	Mesure du débit à la station d'épuration	756
Auburn Hills [Westmoreland <i>et al.</i> , 2006]	100%	Mesure du débit à la station d'épuration	1488
Ann Arbor [Warrow, 2011]	72%	Mesure du débit aux pompes d'évacuation	363

O.4 Station – Travaux communs

L'installation d'un dégrilleur est prévue pour toutes les options. Ses spécifications sont présentées au tableau O.4.

Tableau O.4 Spécifications du dégrilleur

Dimensions du dégrilleur	0,86 m (largeur) 4,4 m (longueur) 2,5 m (hauteur)
Espace entre les ouvertures de la grille	3 mm
Puissance du moteur du dégrilleur	1,1 kW
Puissance de la pompe dans le regard	20 hp (14,9 kW)

Un abri isolé (18m² et 3m de hauteur) protège du gel le dégrilleur et la benne où s'accumulent les déchets. Les eaux usées sortant du dégrilleur seront acheminée vers le bioréacteur ou vers le premier étang aéré selon l'option retenue pour la station d'épuration. La disposition des équipements est illustrée à la figure O.1.

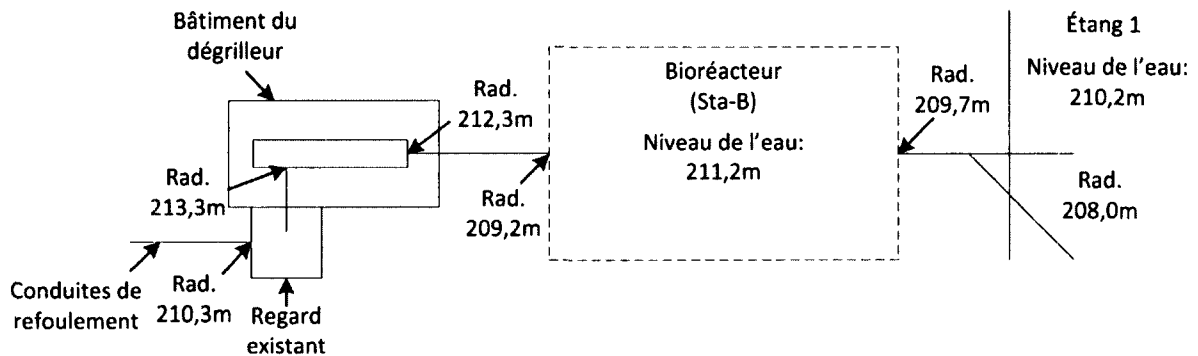


Figure O.1 Configuration du dégrilleur

Les caractéristiques des surpresseurs existants (1 à 3) ainsi que du nouveau surpresseur (4) sont énumérées au tableau O.5

Tableau O.5 Spécifications des surpresseurs

Surpresseur	Débit d'air nominal (m ³ /min)	Puissance du moteur (kW)
1	42,5	56
2	29,9	30
3	29,9	30
4	56,6	93

O.5 Station A – Étang aéré supplémentaire

La disposition de l'étang supplémentaire (étang 2) par rapport aux deux étangs existants (étangs 1 et 3) est illustrée à la figure O.2.

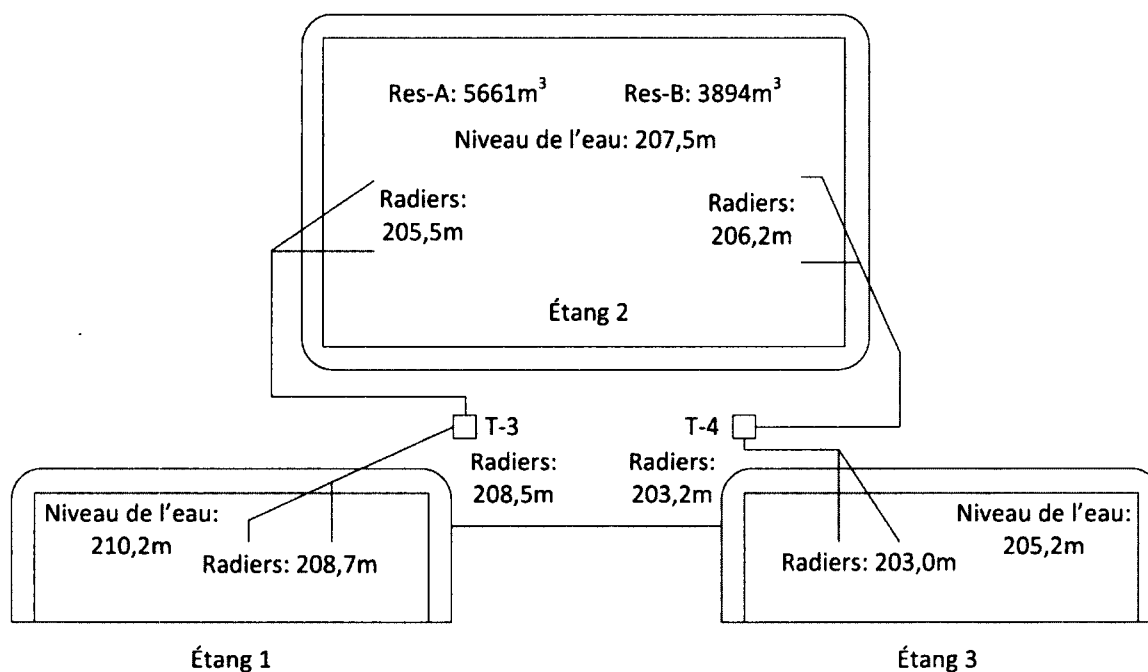


Figure O.2 Configuration de l'étang aéré supplémentaire

Le traitement d'une charge plus importante impose des besoins additionnels en aération, y compris dans les étangs aérés existants. Le nombre d'aérateurs requis dans chaque étang est calculé selon le guide du MDDEP [2010a] en tenant compte de la demande carbonée en oxygène pour toutes les saisons ($2,25\text{kgO}_2/\text{kgDBO}_5$ en été et $1,5\text{kgO}_2/\text{kgDBO}_5$ en hiver) ainsi que de la demande azotée en oxygène en été ($6,0\text{kgO}_2/\text{kgN-NTK}$).

L'enlèvement de la DBO_5 dans chaque étang est estimé à l'aide du modèle utilisé pour le dimensionnement. L'enlèvement de l'azote ammoniacal est évalué selon le taux de nitrification suggéré par le MDDEP [2010a] qui varie en fonction du rapport $\text{DBO}_5/\text{N-NTK}$. La capacité des aérateurs Atara de type 18-3V est pour sa part calculée selon les spécifications du fournisseur et les conditions à la station d'épuration. Le nombre d'aérateurs présenté au tableau N.6 est déduit à partir de la demande en oxygène par étang et de la capacité de transfert d'un aérateur. Dans les quatre cellules existantes, il y a respectivement 40, 30, 22 et 14 aérateurs.

Tableau O.6 Demande en aération dans les étangs aérés (conditions estivales)

Étang - cellule	Réseau - A			Réseau - B		
	Demande (kgO_2)	Transfert ($\text{kgO}_2/\text{aér.}$)	Aérateurs (nb)	Demande (kgO_2)	Transfert ($\text{kgO}_2/\text{aér.}$)	Aérateurs (nb)
E1-C1	473	11,8	40	505	12,7	40
E1-C2	338	11,1	30	341	11,1	30
E2-C3	225	9,5	24	199	9,5	21
E3-C4	170	8,0	22	172	8,0	22
E3-C5	96	8,0	12	94	8,0	12

Pour les nouvelles stations, le fournisseur recommande un débit d'air d'environ 17 m³/h. Ce débit peut toutefois être augmenté pour permettre le traitement d'une charge plus importante. Ainsi, le débit d'air dans les aérateurs pour l'étang 1 a été ajusté pour conserver le même nombre d'aérateurs que dans la configuration actuelle. Dans les deux situations, le débit maximum de 39 m³/h suggéré par le fournisseur est respecté.

En conditions estivales, le débit d'air requis dans l'ensemble des étangs est d'environ 51 m³/min alors que la capacité du surpresseur supplémentaire est de 56,6 m³/min. Au besoin, deux des surpresseurs existants peuvent être combinés pour fournir un débit d'air semblable.

O.6 Station B – Bioréacteur

Les spécifications du bioréacteur sont données au tableau O.7.

Tableau O.7 Spécifications du bioréacteur

Débit moyen dirigé vers le SMBR (m ³ /d)	1930
Volume du bassin (m ³)	144
Part du volume occupé par le média	50%
Temps de rétention (h)	1,75
Enlèvement minimal (kgDBO ₅ /m ² de média)	1,32
Charge en DBO ₅ à l'affluent (kg/d)	238
Charge en DBO ₅ soluble à l'affluent (kg/d)	95,2
Charge en DBO ₅ à l'effluent (kg/d)	142,8
MES à l'affluent (mg/L)	164
MES à l'effluent (mg/L)	184
Nombre d'aérateurs	20 (36 m ³ /h chacun)
Aération requise (m ³ /min)	11,9

La capacité des aérateurs existants à rencontrer la demande en oxygène est validée au tableau O.8.

Tableau O.8 – Demande en aération des les étangs aérés (conditions estivales)

Étang - cellule	Demande (kgO ₂)	Transfert (kgO ₂ /aér.)	Aérateurs requis (nb)	Aérateurs existants (nb)
E1-C1	320	8,6	37	40
E1-C2	255	8,6	30	30
E2-C3	193	8,6	22	22
E2-C4	104	8,6	12	14

En conditions estivales, le débit d'air requis dans l'ensemble des étangs est d'environ 33m³/min. Les surpresseurs 1 et 4 ont tous deux la capacité pour fournir ce débit et peuvent ainsi être utilisés en alternance.

O.7 Station C – Isolation des étangs

Lorsque le système est à l'équilibre, les pertes de chaleur vers l'air et le sol égalent l'apport de chaleur par les eaux usées à l'affluent (équation 0.2).

$$\dot{m}c_p(T_{aff} - T_{eau}) = q_{air} + q_{sol} \quad (0.2)$$

Où :

\dot{m} : débit d'eau à l'affluent (kg/s)

c_p : chaleur spécifique de l'eau (J/kg.K)

T_{aff} : température de l'eau à l'affluent (K)

T_{eau} : température de l'eau dans l'étang (K)

q_{air} : flux de chaleur vers l'air (W)

q_{sol} : flux de chaleur vers le sol (W)

Cette équation est valide pour toutes les cellules, l'effluent de la cellule 1 devenant l'affluent de la cellule 2 et ainsi de suite. Deux phénomènes participent aux flux de chaleur vers l'air et le sol, soit la conduction (à travers les matériaux) et la convection (à l'interface des fluides et des matériaux). Les résistances thermiques propre à ces phénomènes sont estimées à l'aide des équations 0.3 et 0.4.

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (0.3)$$

Où :

R_{cond} : résistance thermique de conduction (K/W)

L : épaisseur du matériau isolant (m)

k : conductivité thermique (W/m.K)

A : surface du matériau isolant (m²)

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (0.4)$$

Où :

R_{conv} : résistance thermique de convection (K/W)

h : coefficient de transfert thermique (W/m².K)

A : surface du matériau isolant (m²)

Le flux de chaleur à travers l'argile et la couverture isolante est estimé par l'équation 0.5. La somme des résistances thermiques prend en compte les phénomènes de conduction et de convection.

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} \quad (0.5)$$

Où :

q : flux de chaleur (W)

ΔT : différence de température (K)

$\sum R$: résistance thermique totale (K/W)

Les valeurs nécessaires au calcul des résistances thermiques sont données au tableau 0.9.

Tableau 0.9 Données de base pour le calcul des transferts thermiques

Températures		Propriétés de l'eau		Surfaces		Épaisseurs	
Taff	279 K	\dot{m}	20,0 kg/s	Asol	3521,5 m ²	Larg	600 mm
Tair	264,2 K	cp	4202 J/kg.K	Aair	3436,5 m ²	Lmem	1,4 mm
Tsol	277 K					Lenv	1,0 mm
						Liso	63,5 mm

Les résistances thermiques évaluées pour chacun des phénomènes contribuant au transfert de chaleur sont données au tableau 0.10.

Tableau N.10 Résistances thermiques

Transfert vers l'air (qair)				Transfert vers le sol (qsol)			
heau	500W/m ² .K	Reau	5,8x10 ⁻⁷ K/W	heau	500W/m ² .K	Reau	5,8x10 ⁻⁷ K/W
kenv	0,386W/m.K	Renv	6,4x10 ⁻⁴ K/W	karg	1,3W/m.K	Rarg	1,3x10 ⁻⁴ K/W
kiso	0,029W/m.K	Riso	1,5x10 ⁻⁶ K/W	kmem	0,26W/m.K	Rmem	1,5x10 ⁻⁶ K/W
hair	25W/m ² .K	Rair	1,2x10 ⁻⁵ K/W				

La capacité des aérateurs est validée en fonction de la demande carbonée et azotée en oxygène. Selon les valeurs données au tableau 0.11, les aérateurs existants sont suffisants dans la mesure où le débit d'air est légèrement augmenté. Le niveau d'aération respecte les recommandations du fournisseur.

Tableau 0.11 Demande en aération des les étangs aérés isolés (conditions estivales)

Étang - cellule	Demande (kgO ₂)	Transfert (kgO ₂ /aér.)	Aérateurs requis (nb)	Aérateurs existants (nb)
E1-C1	508	12,7	40	40
E1-C2	341	11,1	31	32
E2-C3	243	11,1	22	22
E2-C4	160	11,1	14	14

En conditions estivales, le débit d'air requis dans l'ensemble des étangs est d'environ 49 m³/min alors que la capacité du surpresseur 4 est de 56,6 m³/min. Au besoin, le surpresseur 1 et le surpresseur 2 ou 3 peuvent être utilisés simultanément pour fournir un débit semblable.

ANNEXE P – AECV (MODERNISATION DU SMAEU)

P.1 Inventaire de production

Construction du réseau

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Frais contingents (Res-A)	106 862\$	\$US98			55
Frais contingents (Res-B)	154 128\$	\$US98			55
Conduite, égout gravitaire	1700	m			55
Conduite, branchement gravitaire	3784	m			55
Conduite, branchement basse pression	789	m			55
Conduite, branchement sous vide	422	m			55
Regards	20	p			55
Unités de branchement sans arrêt de distribution	184	p			55
Unités de branchement avec arrêt de distribution	11	p			55
Poste basse pression	22	p			55
Câble électrique	357,0	m			55
Poste sous vide	18,0	p			55
Nettoyage et inspection	4 075 \$	\$US98			55

Res-A – Bassin de rétention

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Excavation	989	m3			55
Remblai	148	m3			55
Déblai (à transporter)	860339	kg			55
Déblai (transport)	4301695	kg.km			55
Béton	261926	kg	109,1	m3	55
Armature (acier)	5238,52	kg			55
Regard	1	p			55
Gravier (production)	162483	kg			55
Sable (production)	132941	kg			55
Compaction	444	m ²			55
PVC production (clapets)	6,7	kg			55
PVC moulage (clapets)	6,7	kg			55
Transport, total	22601121	kg.km			55

Res-B – Drains de fondation

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Pompe de puisard	648	p	486		15
Tuyau de plastique 38mm	3888	m			55
Fosse de retenue	0	p			75
Transport, total	6741483	kg.km			55

Item	Quantité	Unité
Conduite PVC 38 mm	1	m
PVC	0,752	kg
PVC (extrusion)	0,752	kg
Transport de la conduite	225,625	kg.km

Construction de la station

Sta-A - Étang aéré supplémentaire (Res-A et Res-B)

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Frais contingents	77 734\$	\$US98			55
Excavation des étangs (A)	6366	m ³			55
Excavation des étangs (B)	4606	m ³			55
Remblayage (endiguement, enrochement, etc.) (A)	7163	m ³			55
Remblayage (endiguement, enrochement, etc.) (B)	5365	m ³			55
Imperméabilisation des étangs (argile) (A)	1644	m ³	3944485	kg	55
Imperméabilisation des étangs (argile) (B)	1189	m ³	2853925	kg	55
Transport de l'argile (A)	118335	t.km			55
Transport de l'argile (B)	85618	t.km			55
<i>Contournement du ruisseau</i>	100	m			55
Membrane géotextile (A)	3675	m ²			55
Membrane géotextile (B)	2891	m ²			55
Gravier (enrochement) (A)	174	m ³	381948	kg	55
Gravier (enrochement) (B)	126	m ³	276348	kg	55
Transport du gravier (A)	11458,45	t.km			55
Transport du gravier (B)	8290,45	t.km			55
Compaction (A)	7350	m ²			55
Compaction (B)	5782	m ²			55
Matériau de déblai (A)	1020	m ³	1631690	kg	55
Transport du matériau de déblai (A)	48950,71	t.km			55
Matériau de déblai (B)	555,81	m ³	889290		55
Transport du matériau de déblai (B)	26678,71	t.km			55
Conduites entre les regards (égout gravitaire) (A)	270	m			55
Conduites entre les regards (égout gravitaire) (B)	225	m			55
<i>Conduite aération inox. 150mm</i>	85	m			55
<i>Conduite aération inox. 100mm (A)</i>	44	m			55
<i>Conduite aération inox. 100mm (B)</i>	30	m			55
<i>Conduite aération galv. 75mm (A)</i>	70	m			55
<i>Conduite aération galv. 75mm (B)</i>	56	m			55
<i>Conduite aération HDPE 75mm (A)</i>	180	m			55
<i>Conduite aération HDPE 75mm (B)</i>	144	m			55
<i>Supports d'alignement (A)</i>	6	p			55
<i>Supports d'alignement (B)</i>	5	p			55
<i>Supports à rouleau (A)</i>	19	p			55
<i>Supports à rouleau (B)</i>	15	p			55
Aérateurs (A)	24	p			55
Aérateurs (B)	21	p			55
Conduite, branchement gravitaire	0	m			55
Utilisation du sol (transformation) (A)	3870	m ²			55
Utilisation du sol (transformation) (B)	3225	m ²			55
Regards	1	p			55
Clôture (A)	2 060 \$	\$US98	892 \$	\$US98	55
Clôture (B)	1 493 \$	\$US98	646 \$	\$US99	55
Déboisement (A)	2 185 \$	\$US98			55
Déboisement (B)	1 583 \$	\$US98			55
Engazonnement (A)	1 453 \$	\$US98			55
Engazonnement (B)	1 053 \$	\$US98			55

Mécanique du bâtiment	2 814 \$	\$US98	7 734 \$	\$US98	20
Vannes	2	p			55
Drainage (A)	4 698 \$	\$US98			55
Drainage (B)	3 404 \$	\$US98			55
Surpresseur et moteur	1	p			20
Dégrilleur	1	p			20
Autres travaux	8 315 \$	\$US98			55

Total transport (Res-A)	178744	t.km			55
Total transport (Res-B)	142859	t.km			55

Sta-B - Bioréacteur

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Frais incidents	86 872\$	\$US98			55
Conduites entre les regards (égout gravitaire)	18	m			55
Excavation pour le bassin	532	m ³			55
Sable (production)	43862	kg			55
Gravier (production)	53609	kg			55
Remblayage	49	m ³			55
Compaction	206	m2			55
Déblai (à transporter)	308376	kg			55
Déblai (transport)	1541880	kg.km			55
Béton armé	105,2	m3	252480	kg	55
Armature (acier)	5049,6	kg			55
Media (HDPE)	684	kg			30
Conduites d'aération hors bassin (150mm acier inox.)	100	m			55
Conduites d'aération en bassin (100mm acier inox.)	24	m			55
Diffuseurs	20	p			55
Garde (aluminium)	50	kg			55
Supports d'alignement	5	p			55
Supports à rouleau	12	p			55
Dégrilleur	1	p			20
Supresseur et moteur	1	p			20
Transport, total	18362370	kg.km			55

Sta-C - Isolation des étangs

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Frais incidents	129 996\$	\$US98			55
Géomembrane (HDPE)	19552	kg			
Extrusion (HDPE)	19552	kg			
Isolant (EPS)	23144	kg			
Extrusion (EPS)	23144	kg			
Excavation (ancrages)	2,25	m ³			
Déblai (à transporter)	3600	kg			
Déblai (transport)	18000	kg.km			
Ancrages (acier galvanisé)	2445,5	kg			
Extrusion (acier galvanisé)	2445,5	kg			
Ancrages (béton)	16965	kg	7,06875	m3	
Cables (acier inoxydable)	733,21	kg			
Filage (acier inoxydable)	733,21	kg			
Dégrilleur	1	p			
Transport, total	50989131	kg.km			

Item	Quantité	Unité
Suppresseur (Hibon SN822) et moteur (WEG 444T)	1	p
Acier inoxydable	50	kg
Fonte	430	kg
Moteur électrique	750	kg
Mise en forme de l'acier	480	kg
Transport des matériaux	326400	kg.km
Transport du surpresseur et du moteur	984000	kg.km
Transport (total)	1310400,00	kg.km

Item	Quantité	Unité
Dégrilleur (IPEC), moteur et pompe	1	p
Acier inoxydable (dégrilleur)	970	kg
Acier galvanisé (benne)	20	kg
Moteur électrique	77	kg
Cable électrique	110	m
Mise en forme de l'acier inoxydable	970	kg
Pompes (Flygt 3153.181)	2	p
Bâtiment	18	m ²
Transport des matériaux	1150600	kg.km
Transport du surpresseur et du moteur	837600	kg.km
Transport (total)	1988200,00	kg.km

Item	Quantité	Unité
Diffuseur (SSI)	1	p
Acier inox. (production)	1,2	kg
Acier inox. (fabrication)	1,2	kg
Transport des aérateurs	1320	kg.km

Opération et entretien du réseau (Res-A et Res-B)

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Électricité (A)	592656	kWh			1
Électricité (B)	527831	kWh			1
Énergie produite par une génératrice diesel	4000	kWh		kWh	1
Nettoyage de poste basse pression	222	p		p	1
Remplacement des pompes basse pression	10,7	p		p	1
P.P. Télémétrie	4 867\$	\$US98		\$US98	1
P.P. Location outillage	6 963\$	\$US98		\$US98	1
P.P. Matériaux - électrique	773\$	\$US98		\$US98	1
P.P. Matériaux - pompes + gén.	7 591\$	\$US98		\$US98	1
P.P. Matériaux - vacuum	2 731\$	\$US98		\$US98	1
P.P. Pompes additionnelles (A)	7,64	p			1
Remplacement des génératrices	0,6	p		p	1
Remplacement des purgeurs d'air	1,3	p		p	1
Inspection regards	566\$	\$US98		\$US98	1
Réparations (regards, conduites, raccordements)	7 306\$	\$US98		\$US98	1
Inspection TV	633\$	\$US98		\$US98	1
Transport des pompes basse pression	317610,8597	kg.km			1
Remplacement des pompes de puisard (A)	31,41818182	p		p	1
Remplacement des pompes de puisard (B)	62,83636364	p		p	1
Transport des pompes de puisard (A)	284327,4373	kg.km			1
Transport des pompes de puisard (B)	568654,8745	kg.km			1
Transport (total) (A)	601938,297	kg.km			1
Transport (total) (B)	886265,7343	kg.km			1

Opération et entretien de la station

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Alun	52014,3	kg			1
Alun (transport)	15604293,19	kg.km			1
Location véhicules et outils	360 \$	\$US98			1
Entretien électrique	266 \$	\$US98			1
Laboratoire	1 474 \$	\$US98			1
Entretien du terrain	776 \$	\$US98			1
Mesure des boues	676 \$	\$US98			1
Remplacement, surpresseurs et moteurs (1989)	0,15	p			1
Remplacement, surpresseurs et moteurs (2009)	0,0318	p			1
Remplacement, dégrilleur	0,0318	p			1
Vidange des boues	0,146666667	p			15

Sta-A - Étang aéré supplémentaire (Res-A et Res-B)

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Électricité (A)	349599	kWh			1
Électricité (B)	348466	kWh			1
Vidange des boues (A)	0,16	p			
Vidange des boues (B)	0,18	p			
Enfouissement des déchets du dégrilleur	846	kg			

Res-A

Émissions	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
NH4 (eau)	0	kg			1
CO2	141347	kg			1
CH4	4945	kg			1
NH4 (air)	4009	kg			1
N2O	3,60	kg			1

Res-B

Émissions	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
NH4 (eau)	-262	kg			1
CO2	141847	kg			1
CH4	4730	kg			1
NH4 (air)	4270	kg			1
N2O	3,60	kg			1

Sta-B – Bioréacteur

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Électricité	299682	kWh	19162771,2	kWh	1
Media	570	kg			
Vidange des boues	0,21	p			
Enfouissement des déchets du dégrilleur	846	kg			
Transport du media	627000	kg.km			

Émissions	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
NH4 (eau)	578	kg			1
CO2	142611	kg			1
CH4	4300	kg			1
NH4 (air)	3430	kg			1
N2O	3,60	kg			1

Sta-C – Isolation des étangs

Item	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
Électricité	339308	kWh	19162771,2	kWh	1
Vidange des boues	0,21	p			
Enfouissement des déchets du dégrilleur	846	kg			

Émissions	Quantité	Unité	Conversion	Unité	Durée
NH4 (eau)	3052	kg			1
CO2	133616	kg			1
CH4	4300	kg			1
NH4 (air)	957	kg			1
N2O	3,60	kg			1

Fin de vie

Réseau (Res-A et Res-B) (excluant les métaux)

Item	Quantité	Unité	Masse	Unité
Poste de pompage (granulat)	4,6	p	2465002,0	kg
Poste de pompage (pêles-mêles)	4,6	p	6842,1	kg
Bassin de rétention	261926	kg	261926,0	kg
Plastique (conduites, égout gravitaire)	35897	m	281481,2	kg
Plastique (conduites, refoulement)	11236	m	56858,4	kg
Plastique (conduites, sous vide)	4341	m	14166,1	kg
Plastique (conduites, branchement basse pression)	8589	m	3259,9	kg
Plastique (conduites, branchement gravitaire)	39527	m	128980,0	kg
Plastique (conduites, branchement sous vide)	3584	m	13962,7	kg
Plastique (clapets) (A)	7	kg	6,7	kg
Regards	403	p	1908131,7	kg
Poste basse pression (granulat)	222	p	532800,0	kg
Poste basse pression (pêles-mêles)	222	p	13630,8	kg
Cable électrique	3486	m	3625,5	kg
Poste sous vide (pêles-mêles)	158	p	19592,0	kg
Bâtiment (granulat et bois)	130	m ²	99216,0	kg
Bâtiment (pêles-mêles)	130	m ²	10699,0	kg
Pompes de poste à basse pression (pêles-mêles)	611	p	2908,4	kg
Pompes de puisard (pêles-mêles) (A)	1296	p	14660,6	kg
Pompes de puisard (pêles-mêles) (B)	3078	p	34819,0	kg

Total (granulat et bois) (A)			5267075,7	kg
Total (pêles-mêles) (A)			570673,3	kg
Total (granulat et bois) (B)			5005149,7	kg
Total (pêles-mêles) (B)			590825,0	kg

Station (Sta-A, Sta-B et Sta-C) (excluant les métaux)

Item	Quantité	Unité	Masse	Unité
Plastique (conduites, égout gravitaire)	950	m	7449,297189	kg
Remblayage des étangs	36000	m ³	0	kg
Membrane géotextile	16714	m ²	2114,421284	kg
HDPE (conduite d'aération)	960	m	647,7108434	kg
Supports d'alignement	9	p	8370	kg
Supports à rouleau (granulat)	22	p	4400	kg
PVC (conduite d'alun)	130	kg	87,71084337	kg
Membrane flottante (granulat)	255	m ²	2448	kg
Membrane flottante (pêles-mêles)	255	m ²	821,1	kg
Aérateurs	106	p	17490	kg
Aérateurs	106	p	742	kg
Regards	8	p	37920,0	kg
Bâtiment (granulat et bois) (principal et dégrilleur)	146	m ²	111427,2	kg
Bâtiment (pêles-mêles) (principal et dégrilleur)	146	m ²	12015,8	kg

Sta-A (Res-A et Res-B)

Item	Quantité	Unité	Masse	Unité
Plastique (conduites, égout gravitaire) (A)	270	m	2117,168675	kg
Plastique (conduites, égout gravitaire) (B)	225	m	1764,307229	kg
Remblayage des étangs (A)	6500	m ³	0	kg
Remblayage des étangs (B)	4800	m ³	0	kg
Membrane géotextile (A)	20389	m ²	2579,330834	kg
Membrane géotextile (B)	19605	m ²	2480,15013	kg
HDPE (conduite d'aération) (A)	180	m	121,4457831	kg
HDPE (conduite d'aération) (B)	144	m	97,15662651	kg
Supports d'alignement (A)	6	p	5580	kg
Supports d'alignement (B)	5	p	4650	kg
Supports à rouleau (granulat) (A)	19	p	3800	kg
Supports à rouleau (granulat) (B)	15	p	3000	kg
Aérateurs (A)	24	p	3960	kg
Aérateurs (B)	21	p	3465	kg
Aérateurs (A)	24	p	168	kg
Aérateurs (B)	21	p	147	kg
Regards	1	p	4740,0	kg

Total (granulat et bois) (A)			200135,2	kg
Total (granulat et bois) (B)			197910,2	kg
Total (pèle-mêle) (A)			26284,7	kg
Total (pèle-mêle) (B)			28366,7	kg

Sta-B

Item	Quantité	Unité	Masse	Unité
Plastique (conduites, égout gravitaire)	18	m	141,1445783	kg
Bassin en béton (granulat)	252480	kg	252480	kg
Remblayage du bassin	532	m ³	0	kg
HDPE (media)	1254	kg	1254	kg
Supports d'alignement	5	p	1950	kg
Supports à rouleau (granulat)	12	p	2400	kg

Total (granulat et bois)			438885,2	kg
Total (pèle-mêle)			25273,2	kg

Sta-C

HDPE (membrane)	19552	kg	19552	kg
EPS (isolant)	23144	kg	23144	kg
Béton (ancrages)	16965	kg	16965	kg

Total (granulat et bois)			199020,2	kg
Total (pèle-mêle)			66574,0	kg

P.2 Évaluation des impacts avec IMPACT2002+

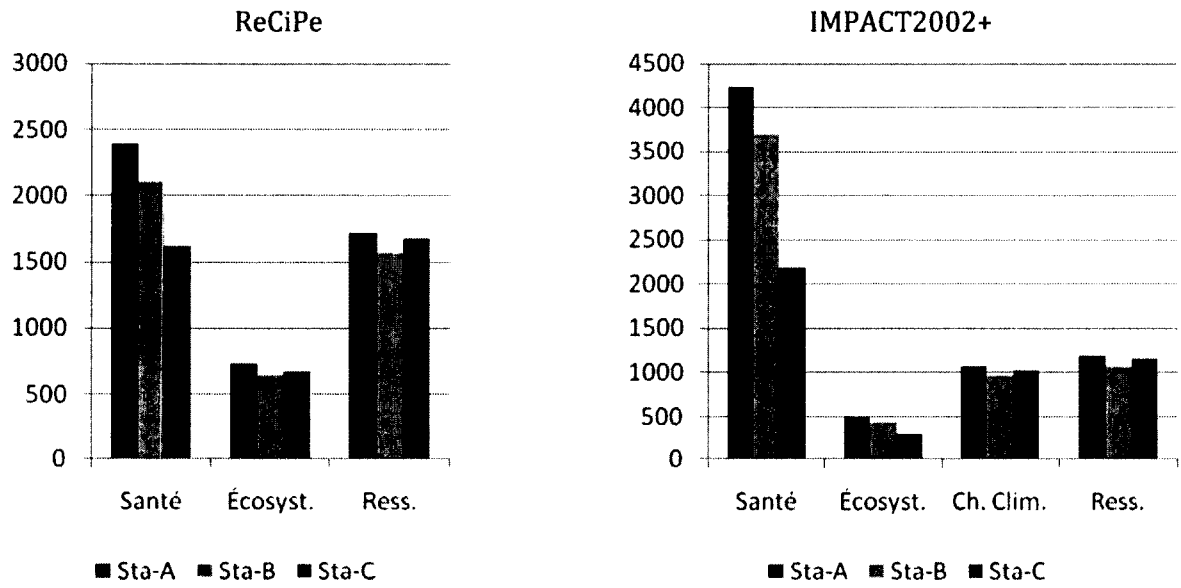


Figure P.1 Impacts de la phase d'opération de la station selon ReCiPe et IMPACT 2002+

ANNEXE Q – ACCV (MODERNISATION DU SMAEU)

Extension et modernisation du réseau (tous les coûts en dollars constants de 2009)

Travaux municipaux

	Travaux de construction	Frais incidents
Res-A	1 131 500 \$	110 300 \$
Res-B	1 693 500 \$	220 700 \$

Interception

	Travaux de construction	Frais incidents
Res-A	316 100 \$	61 500 \$
Res-B	144 100 \$	27 100 \$

Modernisation de la station (tous les coûts en dollars constants de 2009)

Travaux communs (surpresseur et dégrilleur)

	Travaux de construction	Frais incidents
	254 800 \$	61 900 \$

Autres travaux

	Travaux de construction	Frais incidents
Sta-A – Res-A	495 300 \$	98 000 \$
Sta-A – Res-B	382 300 \$	75 400 \$
Sta-B	397 700 \$	68 600 \$
Sta-C	916 100 \$	209 900 \$

Opération et entretien du réseau (tous les coûts en dollars constants de 2009)

	Opération (électricité)	Opération. (autres)	Entretien (annuel)	Entretien (15 ans)	Entretien (20 ans)*
Res-A	58 400 \$	106 100 \$	79 200 \$	99 300 \$	917 700 \$
Res-B	51 000 \$	106 100 \$	79 200 \$	198 700 \$	917 700 \$

* Les pompes (155 000\$) sont changées aux 18 ans pour Res-A.

Opération et entretien de la station (tous les coûts en dollars constants de 2009)

	Opération (électricité)	Opération. (autres)	Entretien (annuel)	Entretien (20 ans)*	Entretien (25 ans)
Sta-A_A	32 300 \$	31 500 \$	10 000 \$	372 900 \$	
Sta-A_B	32 200 \$	31 500 \$	10 000 \$	372 900 \$	
Sta-B	27 700 \$	31 500 \$	10 000 \$	420 200 \$	
Sta-C	31 300 \$	31 500 \$	10 000 \$	372 900 \$	

* La vidange des boues se fait à une fréquence variable selon les options et les étangs.

Fin de vie (tous les coûts en dollars constants de 2009)

Res-A	1 124 400 \$
Res-B	1 083 700 \$

Sta-A – Res-A	442 110 \$
Sta-A – Res-B	406 800 \$
Sta-B	335 200 \$
Sta-C	338 700 \$

ANNEXE R – INDICATEURS POUR LE SUIVI DU SMAEU

Dimension	Critère	Indicateur	Outil
Environnement	Utilisation des ressources	Utilisation des ressources non renouvelables	Analyse environnementale du cycle de vie (AECV)
	Impact sur les écosystèmes	Impact potentiel sur la biodiversité	
	Impact sur la santé humaine	Impact potentiel sur la santé humaine	
Économie	Coûts d'opération (opérations courantes)	Coûts engagés annuellement pour l'opération	Analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV)
	Coûts d'entretien (opérations périodiques)	Coûts annualisés pour l'entretien effectué et projeté	
	Coûts en fin de vie	Coûts annualisés pour la fin de vie projetée	
Société	Nuisances associées au réseau	Nombre de plaintes (refoulements, débordements, odeurs, etc.)	Appels des citoyens auprès des employés municipaux ou des conseillers
	Nuisances associées à la station	Nombre de plaintes (bruit, odeurs, etc.)	
	Santé et sécurité au travail	Nombre d'accidents de travail	Consultation des employés municipaux
	Qualité de vie au travail	Niveau de satisfaction envers le milieu de travail	
	Comportements responsables	Nombre de bris ou d'incidents causés par les comportements délinquants	

ANNEXE S – TEINTES DE DURABILITÉ

Tableau S.1 Teintes de durabilité pour la précision des outils d'analyse

Teinte	A	B	C	D
AECV	ACV simplifiée	ACV basée sur les tableaux économiques d'entrées et sorties	ACV basée sur des données génériques	ACV basée sur des données primaires
ACCV et estimation	Estimation ou suivi pour des projets similaires	Estimation préliminaire	Estimation détaillée	Estimation détaillée confirmée par le suivi
Sondage	Entretiens exploratoires avec quelques personnes	Consultation d'une faible proportion de la population (5%)	Consultation d'une proportion représentative de la population (10%)	Consultation d'une large portion de la population (25%)
Évaluation monétaires des biens et services environnementaux	Transposition de résultats tirés d'autres études	Application sommaire d'une seule technique (évaluation des contingences avec échantillon restreint)	Application détaillée d'une seule technique (évaluation des contingences avec un échantillon représentatif)	Application détaillée d'au moins deux techniques.
Consultation des experts	Évaluation préliminaire par les membres de l'équipe de conception	Évaluation préliminaire par un groupe d'experts externe avec questionnaire	Évaluation préliminaire par un groupe d'experts externe avec entretiens et rétroaction	Évaluation confirmée par des visites d'installations existantes ou un projet pilote
Consultation des parties prenantes	Évaluation par les représentants des parties prenantes avec questionnaire	Évaluation par les représentants des parties prenantes avec entretiens et rétroaction	Évaluation par un groupe de discussion incluant les parties prenantes	Évaluation par un groupe de discussion et un échantillon représentatif de citoyens

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abraham, M.A. (Éd) (2006). Principles of Sustainable Engineering. Dans *Sustainability Science and Engineering: Defining Principles*. Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, p. 3-10.
- ACEE (2008). *Guide sur la participation du public*. Dans Agence canadienne d'évaluation environnementale, *Politiques et orientation*, <http://www.acee-ceaa.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=46425CAF-1&toc=hide&offset=1> (page consultée le 17 mai 2009).
- Agudelo, C., Mels, A. et Braadbaart, O. (2007). Multi-criteria framework for the selection of urban sanitation systems. Dans *2nd SWITCH Scientific Meeting*. UNESCO-IHE, Delft, Pays-Bas, s.p.
- Ahn, J.H., Kim, S., Park, H. Rahm, B., Pagilla, K. et Chandran, K. (2010). N₂O Emissions from Activated Sludge Processes, 2008–2009: Results of a National Monitoring Survey in the United States. *Environmental Science and Technology*, vol. 44, no. 12, p. 4505-4511.
- Allen, D.T., Murphy, C.F. Allenby, B.R. et Davidson, C.I. (2009). Incorporating Sustainability into Chemical Engineering Education. *Chemical Engineering Progress*, vol. 105, no. 1. p. 47-53.
- Anastas, P.T. et Zimmerman, J.B. (2003). Design Through the 12 Principles of Green Engineering. *Environmental Science and Technology*, vol. 37, no. 5, p. 94A-101A.
- Anderson, R.C. (1999). *Mid-Course Correction*. Chelsea Green Publishing, White River Junction, États-Unis, 204 p.
- Andrews, G.C. (2009). *Canadian Professional Engineering and Geoscience: Practice and Ethics*. Nelson Education, Toronto, Canada, 429 p.
- APEGGA (2004). *Guideline for Environmental Practice*. Dans Association of Professional Engineers, Geologists and Geophysicists of Alberta, *Publications: Guidelines*. <http://www.apegga.org/pdf/Guidelines/EnvironmentalPractice.pdf> (page consultée le 10 novembre 2010).
- APEGBC (1995). *Guidelines for Sustainability*. Dans Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia, *Publications: Guidelines*. <http://www.apeg.bc.ca/pppractice/documents/ppguidelines/sustainabilityguidelines.pdf> (page consultée le 10 novembre 2010).
- APEGM (1999). *Sustainable Development*. Dans Association of Professional Engineers and Geoscientists of Manitoba, *Publications: Practice Guidelines*. <http://www.apegm.mb.ca/SustainableDevelopment.html> (page consultée le 15 octobre 2009).
- APEGS (2000). *Environmental Guidelines for Professional Engineers and Geoscientists of Saskatchewan*. Dans Association of Professional Engineers and Geoscientists of Saskatchewan, *Resources: Publications*. <http://www.apegs.sk.ca/adx/asp/adxGetMedia.aspx?DocID=214.1054.1061.Documents&MediaID=1060&Filename=Environmental+Guidelines.pdf> (page consultée le 10 novembre 2010).
- Argyris, C. et Schön, D.A. (1992). *Theory in practice: increasing professional effectiveness*. Jossey-Bass, San Francisco, États-Unis, 260 p.

- Ashley, R., Blackwood, D., Butler, D. et Jowitt, P. (2004). *Sustainable water services: a procedural guide*. IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni, 244 p.
- Ashley, R., Blackwood, D., Butler, D., Jowitt, P., Davies, J., Smith, H., Gilmour, D. et Oltean-Dumbrava, C. (2008). Making asset investment decisions for wastewater systems that include sustainability. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 134, no. 3, p. 200-209.
- Atkins, J.P. et Burdon, D. (2006). An initial economic evaluation of water quality improvements in the Randers Fjord, Denmark. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 53, no. 1-4, p. 195-204.
- Azapagic, A. et Perdan, S. (2005a). An integrated sustainability decision-support framework - Part I: problem structuring. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 12, no. 2, p. 98-111.
- Azapagic, A. et Perdan, S. (2005b). An integrated sustainability decision-support framework - Part II: problem analysis. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 12, no. 2, p. 112-131.
- Bagley, D., Andrews, R., Adams, B. et Karney, B. (2005). Development of Sustainable Water Systems for Urban Areas: a Human Hydrologic Cycle Approach. Dans *Proceedings of the CSCE 2005 Annual Conference*, CSCE, Montreal, Canada, FR-156.
- Balkema, A.J., Preisig, H.A., Otterpohl, R., Lambert, A.J.D. et Weijers, S.R. (2001). Developing a model based decision support tool for the identification of sustainable treatment options for domestic wastewater. *Water Science and Technology*, vol. 43, no. 7, p. 265-269.
- Balkema, A.J., Preisig, H.A., Otterpohl, R. et Lambert, F.J.D. (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, vol. 4, no. 2, p. 153-161.
- Banque mondiale (2003a). *Social Analysis Sourcebook*. Banque mondiale, Washington D.C., États-Unis, 105 p.
- Banque mondiale (2003b). *A User's Guide to Poverty and Social Impact Analysis*. Banque mondiale, Washington D.C., États-Unis, 90 p.
- BAPE (1992). *Rapport d'enquête et de médiation. Projet d'assainissement des eaux : Pointe-Fisher Ouest, Ville de Lac Brome*. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, Québec, Canada, 26 p.
- BAPE (2002). *Règles de procédure relatives au déroulement des audiences publiques*. Dans Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, *Le BAPE*. <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/documentation/Q-2-r19.pdf> (page consultée le 22 décembre 2009).
- Barbier, R. (2005). Quand le public prend ses distances avec la participation – Topiques de l'ironie ordinaire. *Natures Sciences Société*, vol. 13, no. 3, p.258-265.
- Bare, J. (2011). TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Online first, s.p.

- Beavis, P. et Lundie, S. (2003). Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment - LCA in the wastewater industry. *Water Science and Technology*, vol. 47, no. 7-8, p. 109-116.
- Becker, J. (2005). Measuring Progress Towards Sustainable Development: an Ecological Framework for Selecting Indicators. *Local Environment*, vol. 10, no. 1, p. 87-101.
- Belton, V. (1986). A comparison of the analytic hierarchy process and a simple multi-attribute value function. *European Journal of Operational Research*, vol. 26, no. 1, p. 7-21.
- Benetto, E., Nguyen, D., Lohmann, T. Schmitt, B. et Schosseler, P. (2009). Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, vol. 407, no. 5, p. 1506-1516.
- Benoît, C. et Mazjin, B. (Éd.) (2009). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. UNEP/SETAC, Paris, France, 103 p.
- Benyus, J.M. (2002). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Harper Perrenial, New York, États-Unis, 320 p.
- Bodo, R., Hausler, R. et Azzouz, A. (2006). Approche multicritère pour la sélection de plantes aquatiques en vue d'une exploitation rationnelle. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 19, no. 3, p. 181-197.
- Bossel, H. (1999). *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. IISD, Winnipeg, Canada, 124 p.
- Bouchart, F.J.-C., Blackwood, D.J. et Jowitt, P.W. (2002). Decision mapping: understanding decision making processes. *Civil Engineering and Environmental System*, vol. 19, no. 3, p. 187-207.
- Boutaud, A. (2004). *Le développement durable: penser le changement ou changer le pansement?* Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de St-Étienne et Université Jean Monnet, Sciences et génie de l'environnement, St-Étienne, France, 415 p.
- Boyko, C. (2009). *The urban design decision-making process: a new approach*. Dans Cooper, R., Evans, G. et Boyko, C. (Éd.), *Designing sustainable cities*. John Wiley & Sons, Chicester, Royaume-Uni, p. 42-50.
- Bradley, B.R., Daigger, G.T., Rubin, R. et Tchobanoglous, G. (2002). Evaluation of onsite wastewater treatment technologies using sustainable development criteria. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 4, no. 2, p. 87-99.
- Brent, A.C. (2005). The application of life cycle management in decision making for sustainable development at government and corporate level: the integration of project, asset and product life cycles. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, vol. 2, no.2, p. 223-235.
- Brière, F. (2006). *Distribution et collecte des eaux*, 2e éd. Presses internationales Polytechnique, Montréal, Canada, 422 p.

- Brown, C.V. et Jackson, P.M. (1990). *Public Sector Economics*. 4e éd. Blackwell Publishers, Oxford, Royaume-Uni, 622 p.
- Buckley, W. (1998). *Society – A Complex Adaptive System*. OPA, Amsterdam, Pays-Bas, 312 p.
- Burkhard, R., Deletic, A. et Craig, A. (2000). Techniques for water and wastewater management: a review of techniques and their integration in planning. *Urban Water*, vol. 2, no. 3, p. 197-221.
- Byggeth, S.H. (2001). Integration of sustainability aspects in product development. Thèse de doctorat. Chalmers University of Technology et Göteborg University, Göteborg, Suède, 20 p.
- Canadian Society for Civil Engineering (2006). *“Entrusted to Our Care”, CSCE Guidelines for Sustainable Development*. CSCE, Montreal, Canada, 11 p.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin, Boston, États-Unis, 368 p.
- Carson, R.T. (2000). Contingent valuation: a user's guide. *Environmental Science & Technology*, vol. 34, no. 8, p. 1413-1418.
- CCME (2009). *Stratégie pancanadienne pour la gestion des effluents d'eaux usées municipales*. Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg, Canada, 18 p.
- Ceres (1989). *Ceres Principles*. Dans *Ceres, Our History and Impact*. <http://www.ceres.org/about-us/our-history/ceres-principles> (page consultée le 2 septembre 2010).
- CERTU (2006). *Prendre en compte le développement durable dans un projet – Guide d'utilisation de la grille RST₀₂*. CERTU direction générale de l'Urbanisme, de l'Habitation et de la Construction, Lyon, France, 63 p.
- Choe, K., Whittington, D. et Lauria, D.T. (1995). The Economic Benefits of Surface Quality Improvements in Developing Countries: A Case Study of Davao, Philippines. *Land Economics*, vol. 72, no. 4, p. 519-537.
- Clift, R. et Morris, N. (2002). Engineering with a human face. *Engineering Management Journal*, vol. 12, no. 5, p. 226-230.
- CMED (1988). *Notre avenir à tous*. Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Éditions du Fleuve, Montréal, Canada, 454 p.
- Coalition pour le renouvellement des infrastructures du Québec (2006). *Objectif 2020*. Dans Union des municipalités du Québec, *Grands dossiers*. <http://www.umq.qc.ca/fr/grands-dossiers/infrastructures/coalition-pour-le-renouvellement-des-infrastructures-du-quebec/> (page consultée le 7 juin 2010).
- Code de déontologie des ingénieurs, L.R.Q., c. I-9, r.6.*
- COGESAF (2006). *Analyse du bassin versant de la rivière Saint-François*. Comité de gestion du bassin versant de la rivière Saint-François, Sherbrooke, Canada, 255 p.

- Coley, F., Houseman, O. et Roy, R. (2007). An introduction to capturing and understanding the cognitive behaviour of design engineers. *Journal of Engineering Design*, vol. 18, no. 4, p. 311-325.
- Coley, F.J.S. et Lemon, M. (2009). Exploring the design and perceived benefit of sustainable solutions: a review. *Journal of Engineering Design*, vol. 20, no. 6, p. 543-554.
- Commission européenne (2009). *Impact assessment guidelines*. Dans European Commission, *Impact Assessment*. http://ec.europa.eu/governance/impact/commission_guidelines/docs/iag_2009_en.pdf (page consultée le 11 décembre 2009).
- Commission européenne (2010). *Study on Social Impact Assessment*. Dans Commission européenne, *Emploi, affaires sociales et inclusion*. <http://ec.europa.eu/social/main.jsp?langId=fr&catId=89&newsId=935&furtherNews=yes> (page consultée le 2 février 2011).
- Conseil canadien des ingénieurs (2006). *Guide national sur l'environnement et le développement durable*. Dans Ingénieurs Canada, *Guides nationaux*. http://www.engineerscanada.ca/e/files/guideline_enviro_with.pdf (page consultée le 2 décembre 2009).
- Costanza, R., Fisher, B., Ali, S., Beer, C., Bond, L., Boumans, R., Danigelis, N.L., Dickinson, J., Elliot, C., Farley, J., Elliott Gayer, D., MacDonald Gleen, L., Hudspeth, T., Mahoney, D., McCahill, L., McIntosh, B., Reed, B., Turab Rizvi, S.A., Rizzo, D.M., Simpatico T. et Snapp, R. (2007). Quality of life : An approach integrating opportunities, human needs, and subjective well-being. *Ecological Economics*, vol. 61, no. 2-3, p. 267-276.
- Craggs, R. (2005). *Nutrients*. Dans Shilton, A. (Éd.), *Pond Treatment Technology*. IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni, p. 77-96.
- Crul, M.R.M. et Diehl, J.C. (Éd.) (2010). *Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach*. UNEP et Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas, 103 p.
- CSA (2002). *Guide pour la participation du public*. Association canadienne de normalisation, Etobicoke, Canada, 164 p.
- Cyr, M. (2010). Communication personnelle, 5 mai 2010.
- Dahl, R.A. (1970). *Modern Political Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, États-Unis, 118 p.
- Davidson, C.I., Matthews, H.S., Hendrickson, C.T., Allenby, B.R., Crittenden, J.C., Chen, Y., Williams, E., Allen, D.T., Murphy, C.F. et Austin, S. (2007). Adding Sustainability to the Engineer's Toolbox: A Challenge for Engineering Educators. *Environmental Science and Technology*, vol. 41, no. 14, p. 4847-4850.
- Dennison, F.J., Azapagic, A., Clift, R. et Colbourne, J.S. (1998). Assessing management options for wastewater treatment works in the context of life cycle assessment. *Water Science and Technology*. vol. 38, no. 11, p. 23-30.
- Dey, P.K. et Husbands, C. (2005). Social impact assessment: a case study of a sewerage project in Barbados. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 4, no.4, p.464-477.

- Dhillon, B.S. (1996). *Engineering design: a modern approach*. McGraw-Hill, New York, États-Unis, 285 p.
- Dhillon, B.S. (2006). *Creativity for engineers*. World Scientific, Singapour, 281 p.
- Diaper, C. et Sharma, A. (2007). Innovative sewerage solutions for small rural towns. *Water Science and Technology*, vol. 56, no. 5, p. 97-103.
- Dihn, L.T.T., Guo, Y. et Mannan, M.S. (2009). Sustainability evaluation of biodiesel production using multicriteria decision-making. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 28, no. 1, p. 38-46.
- Dixon, A., Simon, M. et Burkitt, T. (2003). Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: Comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. *Ecological Engineering*, vol. 20, no. 4, p. 297-308.
- Dockhorn, T. (2009). *About the economy of phosphorus recovery*. Dans Ashley, K., Mavinic, D. et Koch, F. (Éd.) *International Conference on Nutrient Recovery From Wastewater Streams*. IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni, p. 145-158.
- Doka (2007). *Wastewater Treatment*. Ecolnvent Report No. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf 2009, 55 p.
- Duclos, J.-Y. et Araar, A. (2006). *Poverty and Equity: Measurement, Policy and Estimation with DAD*. Springer, New York, États-Unis, 394 p.
- Durand, C. et Blais, A. (2004). *La mesure*. Dans Gauthier B. (Éd.), *Recherche sociale - De la problématique à la collecte de données*, 4^e éd. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada, p. 185-209.
- Dym, C.L. et Little, P. (2000). *Engineering design: a project-based introduction*. John Wiley & Sons, New York, États-Unis, 278 p.
- Earth Charter Commission (2000). *The Earth Charter*. Dans Earth Charter Associates, *About the Charter*. <http://www.earthcharterinaction.org/content/pages/Read-the-Charter.html> (page consultée le 20 novembre 2010).
- Easton, D. (1965). *A Framework for Political Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, États-Unis, 143 p.
- Ecoinvent Centre (2007). *Overview and Methodology*. Dans Swiss Centre for Life Cycle Inventories, *Ecoinvent report no. 1*. <http://www.ecoinvent.org> (page consultée le 2 mai 2008).
- Ecoinvent Centre (2010). *Ecoinvent data v2.2*. Dans Swiss Centre for Life Cycle Inventories, *Ecoinvent reports no. 1-25*. <http://www.ecoinvent.org> (page consultée le 3 février 2011).
- Edwards, A.R. (2005). *The Sustainability Revolution: Portrait of a Paradigm Shift*. New Society Publishers, Gabriola Island, Canada, 207 p.

- Edwards, W. et Newman, J.R. (1982). *Multiattribute evaluation*. Sage Publications, Beverly Hills, États-Unis, 96 p.
- Emmerson, R.H.C., Morse, G.K., Lester, J.N. et Edge, D.R. (1995). The Life-Cycle Analysis of Small-Scale Sewage-Treatment Processes. *Water and Environment Journal*, vol. 9, no. 3, p. 317–325
- Engineers Australia (2005). *Engineers Australia's Sustainability Charter*. Dans Engineers Australia, *Advocacy Resources*. <http://www.engineersaustralia.org.au/da/index/getfile/id/8929> (page consultée le 10 juillet 2008).
- Engineers Canada (2006). *Guide national sur l'environnement et le développement durable*. Dans Ingénieurs Canada, *Guides nationaux*. http://www.engineerscanada.ca/e/files/guideline_enviro_with.pdf (page consultée le 2 décembre 2009).
- Environnement Canada (2001). *État des effluents urbains au Canada*. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, 71 p.
- Environnement Canada (2003). *Procédés de traitement pour l'enlèvement de l'ammoniac dans les eaux usées municipales*. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, 281 p.
- Environnement Canada (2010a). *Règlement sur les effluents des systèmes d'assainissement des eaux usées*. Dans Gouvernement du Canada, *Gazette du Canada Partie I: Avis et règlements projetés*. <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2010/2010-03-20/html/reg1-fra.html> (page consultée le 20 octobre 2010).
- Environnement Canada (2010b). *Rapport d'inventaire national 1990-2008 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, s.p.
- European Commission (2009). *Roadmap for moving to a low-carbon economy in 2050*. Dans European Commission, *Climate Action*, http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/index_en.htm (page consultée le 10 janvier 2010).
- Fane, A.G. (2007). Sustainability and membrane processing of wastewater for reuse. *Desalination*, vol. 202, no. 1-3, p. 53-58.
- Fédération internationale des ingénieurs-conseils (2004). *Project Sustainability Management – Guidelines*. FIDIC, Genève, Suisse, 40 p.
- Fédération internationale des ingénieurs-conseils (2005). *A systems approach to Project Sustainability Management*. Dans, *Project Sustainability Management*. http://www1.fidic.org/resources/sustainability/psm_man_system_approach_pgb_26jul05.doc (page consultée le 20 novembre 2010).
- Fenner, R.A., Ainger, C.M., Cruickshank, H.J. et Guthrie, P.M. (2006). Widening engineering horizons: Addressing the complexity of sustainable development. *Engineering Sustainability*, vol. 159, no. ES4, p. 145-154.
- Feyzioglu, O., Ersoy, M.S. et Buyukozkan, G. (2008). Multi-criteria selection of alternatives for sustainable urban transportation. Dans *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, Piscataway, États-Unis, p. 395-399.

- FIDIC (2004). *Project Sustainability Management – Guidelines*. Fédération internationale des ingénieurs-conseils, Genève, Suisse, 40 p.
- Field, B. et Olewiler, N. (2002). *Environmental Economics*, 2^e éd. McGraw-Hill Ryerson, Toronto, Canada, 498 p.
- Figueira, J., Greco, S. et Ehrgott, M. (Éd.) (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Science, Boston, États-Unis, 1045 p.
- Fogler, H.S. et LeBlanc, S.E. (1995). *Strategies for Creative Problem-Solving*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, États-Unis, 224 p.
- Foley, J., de Haas, D., Hartley, K. et Lant, P. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Research*, vol. 44, no. 5, p.1654-1666.
- Folladori, G. (2005). Advances and Limits of Social Sustainability as an Evolving Concept. *Canadian Journal of Development Studies*, vol. 26, no.3, p. 501-510.
- Frey, D.D. et Dym, C.L. (2006). Validation of design methods: lessons from medicine. *Research in Engineering Design*, vol. 17, no. 1, p. 45-54.
- Frischknecht, R. (2010). LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, no. 7, p. 666-671.
- Gagnon, B. et Leduc, R. (2006). Intégration des principes de développement durable dans la conception en ingénierie: la conception durable. *Vecteur Environnement*, vol. 39, no. 4, p. 31-45.
- Gagnon, B., Leduc, R. et Savard, L. (2009). Sustainable development in engineering: a review of principles and definition of a conceptual framework. *Environmental Engineering Science*, vol. 26, no. 10, p. 1459-1472.
- Gagnon, B., Leduc, R. et Savard, L. (2012). From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design*, vol. 23, no. 1, p. 49-74.
- Garcia-Valiñas, M.A. (2005). Efficiency and Equity in Natural Resources Pricing: A Proposal for Urban Water Distribution Service. *Environmental and Resource Economics*, vol. 32, no. 2, p. 183-204.
- Gallego, A., Hospidoa, A., Moreira, M.T. et Feijoo, G. (2008). Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 6, p. 931-940.
- Ganoulis, J. (2003). Evaluating alternative strategies for wastewater recycling and reuse in the Mediterranean area. *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 3, no. 4, p. 11-19.

- Gaulke, L.S. (2010). Evaluation Criteria for Implementation of a Sustainable Sanitation and Wastewater Treatment System at Jiuzhaigou National Park, Sichuan Province, China. *Environmental Management*, vol. 45, no. 1, p. 93-104.
- Gendron, C. (2007). *Vous avez dit développement durable?* Presses internationales Polytechnique, Montréal, Canada, 132 p.
- Gendron, C. et Revéret, J-P (2010). Développement durable et innovation: par où commencer? Démarches d'éco-conception. Dans CRSDD, *Cahiers de recherche*. <http://www.crsdd.uqam.ca/Pages/docs/02-10.pdf> (page consultée le 22 octobre 2010).
- Genius, M., Manioudaki, M., Mokas, .E., Pantagakis, E., Tampakakis, D. et Tsagarakis, K.P. (2005). Estimation of willingness to pay for wastewater treatment. *Water Supply*, vol. 5, no. 6 p. 105-113.
- GIEC (2007). *Changements climatiques 2007: Rapport de synthèse*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, 103 p.
- Gingras, F.-P. (2004). *La théorie et le sens de la recherche*. Dans Gauthier B. (Éd.), *Recherche sociale – De la problématique à la collecte de données*, 4^e éd. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada, p. 103-126.
- Godet, M. (2007). *Manuel de prospective stratégique, Tome 1 : Une indiscipline intellectuelle*, 3^e éd. Dunod, Paris, France, 279 p.
- Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. et Van Zelm R. (2009). *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation*. Dans *ReCiPe, Publications*. <http://www.lcia-recipe.net> (page consultée le 2 octobre 2010).
- Gouvernement de l'Ontario (2008). *Section 3: Economic Impact Assessment*. Dans *Assessing Financial and Economic Impacts: A Guide to Informed Decision-Making*. <http://www.reddi.gov.on.ca/guide/ecimpactassessment.htm> (page consultée le 2 décembre 2009).
- Gouvernement du Canada (2004). *Évaluation environnementale stratégique: La directive du Cabinet sur l'évaluation environnementale des projets de politiques, de plans et de programmes*. Dans Agence canadienne d'évaluation environnementale, *Évaluation environnementale stratégique*, http://www.ceaa.gc.ca/Content/B/3/1/B3186435-E3D0-4671-8F23-2042A82D3F8F/CEAA-StrategicFinal_f.pdf (page consultée le 27 novembre 2009).
- Gouvernement du Canada (2007). *Guide d'analyse coûts-avantages pour le Canada : Propositions de réglementations*. Dans Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada, *Affaires réglementaires*. <http://www.tbs-sct.gc.ca/ri-qr/documents/gl-ld/analys/analys-fra.pdf> (page consultée le 15 novembre 2009).
- Government of Manitoba (1997). *Sustainable Development Act*, C.C.S.M., c. S270.
- Government of Quebec (2006). *Sustainable Development Act*, L.R.Q, c. D-8.1.1.

- Graedel, T.E. et Allenby, B.R. (1995). *Industrial Ecology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, États-Unis, 416 p.
- Gray, S. et Booker, N. (2003). Wastewater services for small communities. *Water Science and Technology*, vol. 47, no. 7-8, p. 65-71.
- Grönlund, E., Klang, A., Falk, S. et Hanaeus, J. (2004). Sustainability of wastewater treatment with microalgae in cold climate, evaluated with emergy and socio-ecological principles. *Ecological Engineering*, vol. 22, no. 3, p. 155-174.
- Haughton, G. (1999). Environmental justice and the sustainable city. *Journal of Planning Education and Research*, vol. 18, no. 3, p. 233-243.
- Harper, E.M. et Graedel, T.E. (2004). Industrial ecology: a teenager's progress. *Technology in Society*, vol. 26, no. 2-3, p. 433-445.
- Hasenkamp, T., Arvidsson, M. et Gremyr, I. (2009). A review of practices for robust design methodology. *Journal of Engineering Design*, vol. 20, no. 6, p. 645-657.
- Hatchuel, A. et Weil, B. (2009). C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design*, vol. 19, no. 4, p. 181-192.
- Hébert, M. (2004). Valorisation des boues municipales comme matières fertilisantes au Québec. *Vecteur environnement*, vol 37, no. 5, p. 38-41.
- Hedberg, T. (1999). Attitudes to traditional and alternative sustainable sanitary systems. *Water Science and Technology*, vol. 39, no. 5, p. 9-16.
- Hellström, D. et Jonsson, L. (2004). Evaluation of small wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, vol. 48, no. 11-12, p. 61-68.
- Hensher, D., Shore, N. et Train, K. (2005). Households' Willingness to Pay for Water Service Attributes. *Environmental & Resource Economics*, vol. 32, no. 4, p. 509-531.
- Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M. et Sala-Garrido, R. (2010). Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain. *Science of the Total Environment*, vol. 408, no. 4, p. 953-957.
- Ho, G.E. et Anda, M. (2006). *Centralised versus decentralised wastewater systems in an urban context: the sustainability dimension*. Dans Beck, M.B. et Speers, A. (Éd.), *2nd IWA Leading Edge on Sustainability in Water-Limited Environments*. IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni, p. 81-89.
- Hofstetter, P., Braunschweig, A., Mettier, T., Müller-Wenk, R. et Tietje, O. (1999). The Mixing Triangle: Correlation and Graphical Decision Support for LCA-based Comparisons. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 3, no. 4, p. 97-115.
- Holliday, S. (2000). *The Gerringong Gerroa Sewerage Scheme*. New South Wales Department of Urban Affairs and Planning, Sydney, Australie, 62 p.

- Holmberg, J. et Robèrt, K.-H. (2000). Backcasting From Non-overlapping Principles – A Framework for Strategic Planning. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 7, no. 4, p. 291-308.
- Holt, R. et Barnes, C. (2010). Towards an integrated approach to “Design for X”: an agenda for decision-based DFX research. *Research in Engineering Design*, vol. 21, no. 2, p. 123-136.
- Hospido, A., Moreira, T., Fernandez-Couto, M. et Feijoo, G. (2004). Environmental Performance of a Municipal Wastewater Treatment Plant. *International Journal of Life Cycle Analysis*, vol. 9, no. 4, p. 261-271.
- Houillon, G. et Jolliet, O. (2005). Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 3, p. 287-299.
- Hung, M.-L., Ma, H.-W et Yang, W.-F. (2007). A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management. *Waste Management*, vol. 27, no. 2, p. 209-219.
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K. et Rebitzer, G. (éd.) (2008). *Environmental Life Cycle Costing*. SETAC Press, Pensacola, États-Unis, 191 p.
- Hydro-Québec (2003). *Comparaison des options de production d'électricité*. Dans Hydro-Québec, *Documentation spécialisée*. http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/documentation/pdf/options_energetiques/pop_01_06.pdf (page consultée le 3 février 2011).
- Hydro-Québec (2009a). *Centrales hydroélectriques*. Dans Hydro-Québec, *Hydro-Québec Production*. <http://www.hydroquebec.com/production/centrale-hydroelectrique.html> (page consultée le 4 mars 2009).
- Hydro-Québec (2009b). *Tarif D – Tarif domestique*. Dans Hydro-Québec, *Tarifs et factures*. <http://www.hydroquebec.com/residentiel/tarif-residentiel.html> (page consultée le 3 novembre 2009).
- I~design (2008). *What is inclusive design?* Dans Engineering Design Centre, *Toolkit home*, <http://www.inclusivedesigntoolkit.com/betterdesign/whatis.html> (page consultée le 5 juin 2010).
- IEA (2010a). *Electricity/Heat in Canada in 2007*. Dans International Energy Agency, *Statistics*. http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=CA (page consultée le 7 juillet 2010).
- IEA (2010b). *Electricity/Heat in United States in 2007*. Dans International Energy Agency, *Statistics*. http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=US (page consultée le 7 juillet 2010).
- Ikerd, J.E. (1997). *Toward an Economics of Sustainability*. <http://web.missouri.edu/~ikerdj/papers/econ-sus.htm> (page consultée le 29 avril 2008).
- Institut de la statistique du Québec (2009). *Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2006-2059 – Édition 2009*. Gouvernement du Québec, Québec, Canada, 132 p.

- Institut de la statistique du Québec (2011). *Dépenses moyennes de l'ensemble des ménages1 par grands postes de dépenses, selon le quintile de revenu total, Québec, 2008*. Dans Institut de la statistique du Québec, *Conditions de vie et bien-être / Dépenses* http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/famls_mengs_niv_vie/revenus_depense/depense/t1c_quintr2008.htm (page consultée le 10 juin 2011).
- Institute of Professional Engineers of New Zealand (2004). *Sustainability Principles*. Dans IPENZ, *Sustainability*. http://www.ipenz.org.nz/ipenz/Forms/pdfs/Sustainability_principles.pdf (page consultée le 29 avril 2008).
- Institution of Civil Engineers (2003). *ICE Charter for Sustainable Development*. Dans ICE, *Information Resources*. <http://www.ice.org.uk/getattachment/ed63c4c0-c833-4083-ba2f-fbe82ae2a91f/ICE-Sustainability-Charter.aspx> (page consultée le 10 juin 2008).
- Instituto de la Ingenieria de Espana (2005). *Manifiesto de la ingeniería española por el desarrollo sostenible*. Dans IIE, *Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible*. http://www.iies.es/Comite-de-Ingenieria-y-Desarrollo-Sostenible_a39.html (page consultée le 5 juillet 2009).
- International Association for Impact Assessment (2003). *Social Impact Assessment: International Principles*. Dans IAIA, *Publications*. <http://www.iaia.org/publicdocuments/special-publications/SP2.pdf> (page consultée le 11 décembre 2009).
- International Federation of Consulting Engineers (2000). *Sustainable Development in the Consulting Engineering Industry*. Dans *Sustainable Development*. http://www1.fidic.org/resources/sustainability/fidic_sd_strat_6jun00.pdf (page consultée le 10 juin 2008).
- ISO (2002). *Rapport technique ISO 14062 - Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit*. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 26 p.
- ISO (2006a). *Norme ISO 14040 – Management environnemental - Analyse du cycle de vie: principes et cadre*. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 23 p.
- ISO (2006b). *Norme ISO 14044 – Management environnemental - Analyse du cycle de vie: exigences et lignes directrices*. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 49 p.
- ISO (2008). *Norme ISO 9001 – Systèmes de management de la qualité - Exigences*. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 29 p.
- ISO (2010). *Norme ISO 26000 : Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale*. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 127 p.
- João, E. (2005). Key Principles of SEA, dans Schmidt, M., João, E. et Albrecht, E. (Éd.), *Implementing Strategic Environmental Assessment*. Springer, Berlin, Allemagne, p. 3-14.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. et Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 8, no. 6, p. 324-330.

- Jolliet, O, Cretaz, P., Saadé, M. et Shaked, S. (2010). *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*, 2^e éd. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 302 p.
- Jonas, H. (1991). *Le principe responsabilité : une éthique pour la civilisation technologique*. Éditions du Cerf, Paris, France, 336 p.
- Jones, D. et Tamiz, M. (2010). *Practical Goal Programming*. Springer, New York, 170 p.
- Keiner, M. (2004). Re-emphasizing sustainable development - The concept of "evolutionability". *Environment, Development and Sustainability*, vol. 6, no.4, p. 379-392.
- Keremane, G.B. et McKay, J. (2007). Successful wastewater reuse scheme and sustainable development: a case study in Adelaide. *Water and Environment Journal*, vol. 21, no. 2, p. 83-91.
- Khan, A.M. (2008). Sustainability criteria for the evaluation of urban transportation systems. Dans Bissonnette, B. et Paradis, F., *Proceedings of the CSCE 2008 Annual Conference*, CSCE, Montreal, Canada, TR-496, s.p.
- Kontogianni, A., Langford, I. H., Papandreou, A. et Skourtos, M. S. (2003). Social preferences for improving water quality: An economic analysis of benefits from wastewater treatment. *Water Resources Management*, vol. 17, no. 5, p. 317-336.
- Kontos, N. et Asano, T. (1996). Environmental assessment for wastewater reclamation and reuse projects. *Water Science and Technology*, vol. 33, no. 10-11, p. 473-486.
- Lassaux, S., Renzoni, R. et Germain, A. (2006). Life Cycle Assessment of Water: From the pumping station to the wastewater treatment plant. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, no. 2, p. 118-126.
- Layfield [2010]. *REVOC Insulated Covers Specifications*. Dans Layfield Environmental Systems, *Floating Covers*, http://www.layfieldenvironmental.com/ContentFiles/Files/FullSpecs/3347161303_InsulatedCover.doc (page consultée le 23 janvier 2011).
- Lawn, P. (2004). The sustainable development concept and indicators: an introductory essay. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 3, no. 3-4, p. 199-234.
- Levin, J. et Nalebuff, B. (1995). An Introduction to Vote-Counting Schemes. *Journal of Economic Perspectives*, vol. 9, no. 1, p. 3-26.
- Lim, S.-R., Haewoo, L. et Park, J.M. (2009). Life Cycle Cost Minimization of a Total Wastewater Treatment Network System. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 6, p. 2965-2971.
- Littig, B. et Grießler, E. (2005). Social sustainability: A catchword between political pragmatism and social theory. *International Journal of Sustainable Development*, vol. 8, no. 1-2, p. 65-79.
- Loi sur la qualité de l'environnement*, L.R.Q., c. Q-2.

- Loucks, D.P. et Gladwell, J.S. (1999). *Sustainability Criteria for Water Resource Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 154 p.
- Lu, B. et Gu, P. (2003). Systematic life cycle design for sustainable product development. Dans *Proceedings of the Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, ASME, New York, États-Unis, p. 85-94.
- Lugan, J.-C. (2005). *La systémique sociale*. Presses universitaires de France, Paris, France, 128 p.
- Luhmann, N. (1998). *Social Systems*. Stanford University Press, Stanford, États-Unis, 684 p.
- Lundie, S., Peters, G.M. et Beavis, P.C. (2004). Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning. *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 13, p. 3465-3473.
- Lundin, M., Bengtsson, M. et Molander, S. (2000). Life Cycle Assessment of Wastewater Systems: Influence of System Boundaries and Scale on Calculated Environmental Loads. *Environmental Science & Technology*, vol. 34, no. 1, p. 180-186.
- Lundin, M. et Morrison, G.M. (2002). A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. *Urban Water*, vol. 4, no.2, p.145-152.
- Lundqvist, U. (2000). *On Sustainability Indicators and Sustainable Product Development*. Thèse de doctorat. Chalmers University of Technology et Göteborg University, Göteborg, Suède, 51 p.
- Mabarex (2010). *Équipement de procédé – Fiche d'information technique : Réacteur biologique à support fluidisé SMBR avec garnissage Peenox*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Fiches d'évaluation technique*, http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/usees/fiches/SMBR_Peenox.pdf (page consultée le 2 février 2011).
- Machado, A.P. Urbano, L., Brito, A.G., Janknecht, P., Salas, J.J. et Nogueira, R. (2007). Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities. *Water Science and Technology*, vol. 56, no. 3, p. 15-22.
- Maier, J.R.A. et Fadel, G.M. (2009). Affordance based design: a relational theory for design. *Research in Engineering Design*, vol. 20, no. 1, p. 13-27.
- Makropoulos, C.K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K. et Butler, D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*, vol. 23, no. 12, p. 1448-1460.
- Malmqvist, P.-A., Heinicke, G., Kärrman, E., Stenström, T. A. et Svensson, G. (Éd.) (2006). *Strategic Planning of Sustainable Urban Water Management*. IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni, 264 p.
- MAMR (2005). *Guide explicatif concernant la consultation publique sur un projet d'élevage porcin*. Ministère des affaires municipales et des régions, Québec, Canada, 70 p.
- MAMR (2007). *Ouvrages de surverse et stations d'épuration : Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2006*. Dans Ministère des Affaires

- municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire. *Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux (SOMAE)*, http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/infrastructures/suivi_ouvrages_assainissement_eaux/eval_perform_rapport_2006.pdf (page consultée le 2 mai 2010).
- MAMROT (2009). *Rapport annuel 2008-2009 – Société québécoise d'assainissement des eaux*. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire. Gouvernement du Québec, Québec, Canada, 27 p.
- MAMROT (2010). *Ouvrages de surverse et stations d'épuration : Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2009*. Dans Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire. *Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux (SOMAE)*, http://www.mamrot.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/infrastructures/suivi_ouvrages_assainissement_eaux/eval_perform_rapport_2009.pdf (page consultée le 4 octobre 2010).
- Martin, C., Ruperd, Y. et Legret, M. (2007). Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *European Journal of Operational Research*, vol. 181, no. 1, p. 338-349.
- Maystre, L.Y. et Bollinger, D. (1998). *Aide à la decision multicritère*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 208 p.
- McConville, J.R. et Mihelcic, J.R. (2007). Adapting Life-Cycle Thinking Tools to Evaluate Project Sustainability in International Water and Sanitation Development Work. *Environmental Engineering Science*, vol. 24, no. 17, p. 937-948.
- McDonough, W. et Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle*. North Point Press, New York, États-Unis, 193 p.
- MDDEP (2003). *Guide de réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Évaluations environnementales*, http://www.mddep.gouv.qc.ca/evaluations/guide_realisation/index.htm (page consultée le 12 novembre 2009).
- MDDEP (2008). *Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Matières résiduelles*. http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/guide-mrf.pdf (page consultée le 22 octobre 2009).
- MDDEP (2010a). *Chapitre 6 – Lagunage*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles du traitement des eaux usées d'origine domestique*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/index.htm> (page consultée le 4 novembre 2010).
- MDDEP (2010b). *Chapitre 8 – Traitement tertiaire*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles du traitement des eaux usées d'origine domestique*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/index.htm> (page consultée le 4 novembre 2010).

- MDDEP (2011a). *Chapitre 2 – Débits et charges*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles du traitement des eaux usées d'origine domestique*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/index.htm> (page consultée le 2 juin 2011).
- MDDEP (2011b). *Plan d'intervention sur les algues bleu-vert 2007-2017*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Algues bleu-vert*. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/algues-bv/plan_intervention_2007-2017.pdf (page consultée le 2 juin 2011).
- MDDEP (2011c). *Démarche d'autorisation des projets comportant le rejet d'une forte charge d'azote ammoniacal dans des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux (OMAE)*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Eau*. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/NH4_OMAE.pdf (page consultée le 12 juin 2011).
- MDDEP (2011d). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles – Plan d'action 2011-2015*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Matières résiduelles*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/presentation.pdf> (page consultée le 2 mars 2011).
- Meadows, D. H., Randers, J., Meadows, D.H. et Behrens, W.W. (1972). *Halte à la croissance*. Fayard, Paris, France, 314 p.
- Meinzingler, F. (2010). *Resources efficiency of urban sanitation systems: a comparative assessment using material and energy flow analysis*. Thèse de doctorat, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hambourg, Allemagne, 227 p.
- Memon, F. A., Zheng, Z., Butler, D., Shirley-Smith, C., Lui, S., Makropoulos, C. et Avery, L. (2007). Life cycle impact assessment of greywater treatment technologies for new developments. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 129, no. 1-3, p. 27-35.
- MENV (1989). *Directive 004 – Réseaux d'égout*. Dans MDDEP, *Eau*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/dir004/index.htm> (page consultée le 2 mars 2009).
- MENV (2002). *Portrait global de la qualité des eaux au Québec*. Dans Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, *Eau*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/sys-image/global/index.htm> (page consultée le 3 octobre 2007).
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater engineering, treatment and reuse*, 4e éd. McGraw-Hill, Boston, États-Unis, 1819 p.
- Michaud, F. (2010). *Using fixed effects to control for unobserved preferences and forgotten variables in Contingent Valuation econometric models*. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 122 p.
- Millenium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human-Being: General Synthesis*. Island Press, Washington D.C., États-Unis, 137 p.

- Miller, B., Vehar, J. et Firestien, R. (2001). *Créativité sans limites*, traduit de l'anglais par S. Matte, THinc, Evanston, États-Unis, 112 p.
- Miller, G.T. (2005). *Living in the Environment*. Brooks/Cole-Thompson, Pacific Grove, États-Unis, 720 p.
- Montmarquette, C. et Scott, I. (2007). *Taux d'actualisation pour l'évaluation des investissements publics au Québec* (Rapport de projet 2007RP-02). CIRANO, Montréal, Canada, 30 p.
- Mosborg, S., Adams, R. Kim, R., Atman, C.J., Turns, J. et Cardella, M. (2005). Conceptions of the engineering design process: an expert study of advanced practicing professionals. Dans *Proceedings of the Annual ASEE Conference*, ASEE, Washington D.C., s.p.
- Mosley, E. (2006). A sustainability rating system for wastewater treatment systems. *Journal of New England Water Environment Association*, vol. 40, no. 1, p. 31-37.
- MRNF (2009). *Production d'électricité*. Dans Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, *Statistiques énergétiques*, <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-electricite.jsp> (page consultée le 2 mars 2010).
- Muga, H.E. et Mihelcic, J.R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, vol. 88, no. 3, p. 437-447
- Munda, G. (2005). Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development. Dans Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (Éd.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Science, Boston, États-Unis, p. 953-986.
- Mulder, K. (2006). *Sustainable development for engineers*. Greenleaf Publishing Sheffield, Royaume-Uni, 256 p.
- Murray, A., Ray, I. et Nelson, K.L. (2009). An innovative sustainability assessment for urban wastewater infrastructure and its application in Chengdu, China. *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 11, p. 3553-3560
- Nakicenovic, N. et Swart, R. (2000). *Special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 612 p.
- Nations Unies (2010). *The Millenium Development Goals Report 2010*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York, États-Unis, 76p.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S. et Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, vol. 60, no. 3, p. 498-508.
- Neumann, W.L. (1994). *Social Research Methods*, 2^e éd. Allyn and Bacon, Boston, États-Unis, 538 p.
- Neumayer, E (2003). *Weak versus Strong Sustainability*, 2^e éd. Edward Elgar Publishing, Northampton, États-Unis, 271 p.

- Norris, G. A. (2001). Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 6, no. 2, p. 118-120.
- Novotny, V., Ahern, J. et Brown, P. (2010). *Water Centric Sustainable Communities*. John Wiley & Sons, Hoboken, États-Unis, 606 p.
- O'Brien, M., Doig, A. et Clift, R. (1996). Social and Environmental Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, no. 4, p. 231-237.
- OCDE (1995). *Évaluation économique des politiques et projets environnementaux*. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris, France, 198 p.
- OCDE (2002). *Sustainable Development Strategies: A Resource Book*. Organisation de coopération et de développement économique, Earthscan Publications, Londres, Royaume-Uni, 358 p.
- Odum, H.T. (1996). *Environmental accounting: emergy and environmental decision making*. John Wiley & Sons, New York, 370 p.
- OECD (2002). *Towards Sustainable Household Consumption?* OECD Publications, Paris, France, 161 p.
- OECD (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD Publications, Paris, France, 158 p.
- Office québécois de la langue française (1990). *Concept*. Dans Office québécois de la langue française, *Grand dictionnaire terminologique*. <http://www.granddictionnaire.com/> (page consultée le 7 janvier 2007).
- Office national de l'énergie (2007). *Exportations et importations d'électricité – Statistiques mensuelles pour décembre 2006*. Dans *Statistiques sur les exportations et importations d'électricité*, http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/sttstc/lctrctyxprtmprt/2006/lctrctyxprtmprt2006_12-fra.pdf (page consultée le 4 avril 2009).
- Office national de l'énergie (2008). *Exportations et importations d'électricité – Statistiques mensuelles pour décembre 2007*. Dans *Statistiques sur les exportations et importations d'électricité*, http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/sttstc/lctrctyxprtmprt/2007/lctrctyxprtmprt2007_12-fra.pdf (page consultée le 4 avril 2009).
- Oldenburg, M. (2007). *Final cost calculation report for the demonstration project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Feaces and Graywater" (SCST)* (Rapport technique). OtterWasser GmbH, Lubeck, Allemagne, 63 p.
- OIQ (2003). *Guide de pratique professionnelle*. Ordre des ingénieurs du Québec, Montréal, Canada, 112 p.
- OIQ (2009). *Notes préparatoires à l'examen professionnel*. Dans Ordre des ingénieurs du Québec, *Publications*. http://www.oiq.qc.ca/Documents/DAP/permis/notes_preparatoires-fr.pdf (page consultée le 3 avril 2011).

- OIQ (2011). *Guide de pratique professionnelle*. Dans Ordre des ingénieurs du Québec, *Guide de pratique professionnelle*, <http://www.gpp.oiq.qc.ca/> (page consultée le 10 juin 2011).
- Olson, D.L. (2004). Comparison of weights in TOPSIS models. *Mathematical and Computer Programming*, vol. 7, no. 7-8, p. 721-727.
- Ordre des ingénieurs du Québec (2003). *Guide de pratique professionnelle*. Ordre des ingénieurs du Québec, Montreal, Canada, 112 p.
- Ostergaard, K.J. et Summers, J.D. (2009). Development of a systematic classification and taxonomy of collaborative design activities. *Journal of Engineering Design*, vol. 20, no. 1, p. 57-81.
- Otterpohl, R., Braun, U. et Oldenburg, M. (2004). Innovative technologies for decentralised water, wastewater and biowaste management in urban and peri-urban areas. *Water Science and Technology*, vol. 48, no. 11-12, p. 23-32.
- Otto, K. et Wood, K. (2001). *Product design: techniques in reverse engineering and new product development*. Prentice Hall, Upper Saddle River, États-Unis, 1065 p.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. et Grote, K.H. (2007). *Engineering design: a systematic approach*, 3e éd. Springer, New York, États-Unis, 617 p.
- Palme, U., Lundin, M., Tillman, A.-M. et Molander, S. (2005). Sustainable development indicators for wastewater systems - researchers and indicator users in a co-operative case study. *Resource Conservation and Recycling*, vol. 43, no. 3, p. 293-311.
- Palme, U. (2010). Multiple conceptions of sustainable urban water systems: problem or asset? *Water Policy*, vol. 12, no. 3, p. 425-443.
- Parkin, M., Bade, R. et Carmichael, B. (2005). *Introduction à la macroéconomie moderne*. ERPI, Saint-Laurent, Canada, 569 p.
- Parris, T.M. et Kates, R.W. (2003). Characterizing and measuring sustainable development. *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 28, no. 13, p. 559-586.
- Parrish, B.D. (2007). Designing the Sustainable Enterprise. *Futures*, vol. 39, no. 7, p. 846-860.
- Passet, R. (1996). *L'économie et le vivant*. 2e éd. Economica, Paris, France, 292 p.
- Pedersen, K., Emblemståg, J., Bailey, R., Allen, J.K. et Mistree, F. (2000). Validating design methods & research: the validation square. Dans *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences*, ASME, New York, DMT-14579, s.p.
- PEGNL (s.d.). *PEGNL Environmental Guidelines*. Dans Professional Engineers and Geoscientists of Newfoundland and Labrador, *Publications*. http://www.pegnl.ca/documents/document_7.pdf (page consultée le 10 novembre 2010).
- Pezzey, J. (1992). *Sustainable development concepts: an economic analysis*. World Bank, Washington D.C, États-Unis, 71 p.

- PNUD (2010). *Rapport sur le développement humain 2010 - La vraie richesse des nations : les chemins du développement humain*. Programme des Nations Unies pour le développement, New York, États-Unis, 254 p.
- Pôle d'écoconception et management de cycle de vie et Institut de développement de produit (2009). *L'écoconception: quels retours économiques pour l'entreprise?* Dans Institut de développement de produit, *Écoconception*. http://www.idp-ipd.com/ecoconception/idp_eco_etude.pdf (page consultée le 20 janvier 2010).
- Prasanta Kumar, D. et Calvin, H. (2005). Social impact assessment: a case study of a sewerage project in Barbados. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 4, no.4, p. 464-477
- Raftelis Financial Consultants (2006). *City of San Diego Wastewater Cost of Service Rate Study*. RFC, Pasadena, États-Unis, 59 p.
- Raval, P. et Donnelly, T. (2002). Multi-criteria Decision Making Model for Wastewater System Using Sustainability as Criterion. Dans *Proceedings of the Joint ASCE-EWRI Water Resources Planning and Management Conference*, American Society of Civil Engineers, Reston, États-Unis, s.p.
- Rawls, J. (1998). *Théorie de la justice*, trad. de l'anglais par C. Audard. Éditions du Seuil, Paris, France, 666 p.
- Rebitzer, G., Hunkeler, D. et Jolliet, O. (2003). LCC - The Economic Pillar of Sustainability: Methodology and Application to Wastewater Treatment. *Environmental Progress*, vol. 22, no. 4, p. 241-249.
- Redclift, M. (2005). Sustainable Development (1987-2005): An Oxymoron Comes of Age. *Sustainable Development*, vol. 13, no. 4, p.212-227.
- Renou, S. (2006). *Analyse du cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Lorraine, France, 258 p.
- Renou, S., Thomas, J.S., Aoustin, E. et Pons, M.N. (2008). Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 10, p. 1098-1105.
- Renzetti, S., et Kushner, J. (2004). Full cost accounting for water supply and sewage treatment: Concepts and case application. *Canadian Water Resources Journal*, vol. 29, no. 1, p. 13-22.
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement*, R.R.Q., c. Q-2, r. 9.
- Rich, L.G. (1999). *High Performance Aerated Lagoon Systems*. American Academy of Environmental Engineers, Annapolis, États-Unis, 216 p.
- Robèrt, K.-H., Schmidt-Bleek, B., Aloisi de Larderel, J., Basile, G., Jansen, J. L., Kuerh, R., Price Thomas, P., Suzuki, M., Hawken, P. et Wackernagel, M. (2002). Strategic sustainable development - selection, design and synergies of applied tools. *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, no. 3, p. 197-214.

- ROBVQ (2008). Formation sur la gestion intégrée de l'eau par bassin versant. Dans Regroupement des organisations de bassin versant du Québec, *Documentation*. www.robvq.qc.ca/documentation/followme/4464 (page consultée le 22 décembre 2009).
- Roig, B., Allan, J.I. et Greenwood, R. (2005). *A toolbox of existing and emerging methods for water monitoring under the WFD*. Dans SWIFT-WFD, *Public Information*, <http://www.swift-wfd.com/Local/swift/dir/doc/D5.pdf> (page consultée le 15 août 2006).
- Rollins, K., Frehs, J., Tate, D. et Zachariah, O. (1997). Resource Valuation and Public Policy: The Case of Water Pricing. *Canadian Water Resources Journal*, vol. 22, no. 2, p. 185-195.
- Rothman, D.S., Agard, J. et Alcamo, J. (2007). *The future today*. Dans United Nations Environment Program, *Global environment outlook 4*, UNEP, Paris, France, p. 397-454.
- RS Means (2008). *Metric construction cost data*. RS Means Company, Kingston, États-Unis, 1029 p.
- Rushing, A.S. et Lippiatt, B.C. (2008). *Energy Price Indices and Discount Factors for Life-Cycle Cost Analysis – April 2008*. Dans National Institute of Standards and Technology, *Publication*. <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build08/PDF/b08019.pdf> (page consultée le 3 mai 2009).
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, États-Unis, 287 p.
- Sabourin, P. (2004). *L'analyse de contenu*. Dans Gauthier B. (Éd.), *Recherche sociale – De la problématique à la collecte de données*, 4^e éd. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada, p. 357-385.
- Sahely, H.R., Kennedy, C.A. et Adams, B.J. (2005). *Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, p. 72-85.
- Saleh, J.H., Mark, G. et Jordan, N.C. (2009). Flexibility: a multi-disciplinary literature review and research agenda for design flexible engineering systems. *Journal of Engineering Design*, vol. 20, no. 3, p. 307-323.
- Savoir-Zajc, L. (2004). *L'entrevue semi-dirigée*. Dans Gauthier B. (Éd.), *Recherche sociale – De la problématique à la collecte de données*, 4^e éd. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada, p. 293-316.
- Sen, A. (1999). *Development as Freedom*. Anchor Books, New York, États-Unis, 366 p.
- Schultz, J., Brand, F., Kopfmüller, J. et Ott, K. (2008). Building a “theory of sustainable development”: two salient conceptions within the German discourse. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 7, no. 4, p. 465-482.
- Schmidt-Bleek, F. (1994). *How to reach a sustainable economy?* Wuppertal Paper no.24. Wuppertal Institute, Berlin, Allemagne, 10 p.
- Sheikh, I. et Lovins, A.B. (2006). Wanted: Masters of Elegant Frugality. *Chemical Engineering Progress*, vol. 102, no. 9, p. 60.

- Singhirunnusorn, W. et Strenstrom, M.K. (2009). Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: criteria and indicator assessment in Thailand. *Water Science and Technology*, vol. 59, no. 9, p. 1873-1894.
- Smith, B.R. (2009). Re-thinking wastewater landscapes: combining innovative strategies to address tomorrow's urban wastewater treatment challenges. *Water Science and Technology*, vol. 60, no. 6, p. 1465-1473.
- Spangenberg, J.H. (2004). Reconciling sustainability and growth: criteria, indicators, policies. *Sustainable Development*, vol. 12, no. 2, p. 74-86.
- Spangenberg, J.H. (2005). Economic sustainability of the economy: Concepts and indicators. *International Journal of Sustainable Development*, vol. 8, no. 1-2, p. 47-64.
- SQAE, MENVIQ et EAT Environnement (1994). *Assainissement des eaux usées dans les petites communautés: techniques particulières de collecte des eaux usées*. Gouvernement du Québec, Québec, Canada, 669 p.
- Statistique Canada (2008). Composantes des profils cumulatifs - Québec, aires de diffusion, produit no. 94-581-X2006002 au catalogue de Statistique Canada, <http://ivt.crepuq.qc.ca.ezproxy.usherbrooke.ca/recensements/recensement2006/recensPop2006ProfCum.html#que> (page consultée le 28 février 2009).
- Stivers, R.L. (1976). *The Sustainable Society: Ethics and Economic Growth*. Westminster Press, Philadelphie, États-Unis, 240 p.
- Suh, N.P. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press, New York, États-Unis, 401 p.
- Suh, S. (2004). *Materials and Energy Flows in Industry and Ecosystem Networks*. Thèse de doctorat, Leiden University, Leiden, Pays-Bas, 196 p.
- Sundberg, C. Svensson, G. et Söderberg, H. (2004). Re-framing the assessment of sustainable stormwater systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 6, no. 2, p. 120-127.
- Surampalli, R.Y., Ninaroon, S. et Banerji, S.K. (1999). Performance Evaluation of Aerated Lagoon in Summer and Winter Conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 13, no. 3, p. 153-163.
- Swiss Federal Statistical Office (2005). *Postulates of Sustainable Development*. <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/en/index/themen/21/02/ind9.approach.905.html> (page consultée le 29 avril 2008).
- Szargut, J. (2005). *Exergy method: technical and ecological applications*. WIT Press, Southampton, Royaume-Uni, 164 p.
- Tangsubkul, N., Beavis, P., Moore, S.J., Lundie, S. et Waite, T.D. (2005). Life cycle assessment of water recycling technology. *Water Resources Management*, vol. 19, no. 5, p. 521-537.

- Tapvong, C. et Kruavan, J. (1999). *Water Quality Improvements: A Contingent Valuation Study of The Chao Phraya River* (Rapport de recherche 1999121). International Development Research Centre, Ottawa, Canada, 51 p.
- Teknika (1997). Dans Dorval, C. (2005), *Ajout d'un étang aéré – Station d'épuration des eaux usées – Bassin Saint-Élie-d'Orford* (Rapport de conception F051033001), Les Consultants S.M. inc., Sherbrooke, Canada, 34 p.
- Teodoro, M.P. (2005). Measuring fairness: Assessing the equity of municipal water rates. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 97, no. 4, p. 111-124.
- Tidaker, P., Karrman, E., Baky, A. et Jonsson, H. (2006). Wastewater management integrated with farming - an environmental systems analysis of a Swedish country town. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 47, no. 4, p. 295-315.
- Tillman, A.-M., Svingby, M. et Lundström, H. (1998). Life Cycle Assessment of Municipal Waste Water Systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 3, no. 3, p. 145-157.
- The Conference Board (2011). *The Conference Board Total Economy Database*. Dans The Conference Board, *Productivity and Innovation*. <http://www.conference-board.org/data/economydatabase/> (page consultée le 3 février 2011).
- The Conference Board of Canada (2009). *Life satisfaction*. Dans The Conference Board of Canada, *Society*. <http://www.conferenceboard.ca/HCP/Details/society/life-satisfaction.aspx> (page consultée le 3 septembre 2010).
- The Royal Academy of Engineering (2005). *Engineering for Sustainable Development: Guiding Principles*. The Royal Academy of Engineering, Londres, Royaume-Uni, 48 p.
- Thibault, M. et Leclerc, A. (2007). *Traité d'écoconception*. Faculté de l'aménagement de l'Université de Montréal, Montréal, Canada, 115 p.
- Thorne, K. (2011). *Communication personnelle*, 20 avril 2011.
- Tremblay, M.-A. (1968). *Initiation à la recherche dans les sciences humaines*. McGraw-Hill, Montréal, Canada, 425 p.
- Tziakisa, I. Pachidakisa, I., Moraitakisa, M., Xideasa, K., Theologisa, G. et Tsagarakis, K.P. (2009). Valuing benefits from wastewater treatment and reuse using contingent valuation methodology. *Desalination*, vol. 237, no. 1-3, p. 117-125.
- UICN (1980). *World Conservation Strategy*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Gland, Suisse, s.p.
- UN (2010). *The Millenium Development Goals Report 2010*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, New York, États-Unis, 76 p.
- UNEP (2005). *The DPSIR Framework*. Dans United Nations Environment Program, *Maps and Graphics*. http://maps.grida.no/go/graphic/the_dpsir_framework. (page consultée le 29 avril 2008).

- UNEP (2007). *Life cycle management – A business guide to sustainability*. United Nations Environment Program, Paris, France, 51 p.
- United Kingdom Government (2005). *UK Government Sustainable Development Strategy*. TSO, Norwich, Royaume-Uni, 186 p.
- United Nations (1992). *Rio Declaration on Environment and Development*. Dans UNEP, *Publications*, <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=78&ArticleID=1163> (page consultée le 23 août 2008).
- USDOE (2007). *Electric Power Monthly March 2007*. Dans U.S. Department of Energy, *Electric Power Monthly Back Issues* <http://www.eia.gov/ftproot/electricity/epm/02260703.pdf> (page consultée le 3 février 2009).
- USDOE (2008). *Electric Power Monthly March 2008*. Dans U.S. Department of Energy, *Electric Power Monthly Back Issues* <http://www.eia.gov/ftproot/electricity/epm/02260803.pdf> (page consultée le 3 février 2009).
- USGBC (2005). *LEED for new constructions and major renovations*. Dans U.S. Green Building Council, *Resources*. <http://www.usgbc.org/ShowFile.aspx?DocumentID=1095> (page consultée le 20 janvier 2010).
- Vachon, J.-F. L., Baulne-Bélisle, K., Rosset, J., Gariépy, B. et McGrath, K. (2009). *Profil de la gestion des débris de construction, rénovation et démolition (CRD) au Québec*. Dans Recyc-Québec, *Centre de documentation*. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/MICI/Rapport-CRD-09.pdf> (page consultée le 2 mai 2010).
- Valentin, A. et Spangenberg, J.H. (2000). Guide to community sustainability indicators. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 20, no. 3, p. 381-392.
- Van Bohemen, H. (Éd.) (2005). *Ecological Engineering - Bridging between Ecology and Civil Engineering*. Aeneas Technical Publishers, Delft, Pays-Bas, 399 p.
- Van Vliet, B. et Steine, N. (2004). New Consumer Roles in Waste Water Management. *Local Environment*, vol. 9, no. 4, p. 353-366.
- Venkatachalam, L. (2004) The contingent valuation method: a review. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 24, no. 1, p. 89-124.
- Vié, J.-C., Hilton-Taylor, C. et Stuart, S.N. (2009). *Wildlife in a changing world - An analysis of the 2008 IUCN red list of threatened species*. IUCN, Gland, Suisse, 155 p.
- Ville de Sherbrooke (2007). *Règlement général de la Ville de Sherbrooke – Titre 6 : Environnement*. Dans Ville de Sherbrooke, *Lois et règlements*. http://www.ville.sherbrooke.qc.ca/webconcepteur/web/Villedesherbrooke/fr/vivre/service.prt?svcid=VS_PAGE_GENERIQUE_CATEGORIES102&iddoc=101150&page=details.jsp (page consultée le 3 septembre 2008).
- Ville de Sherbrooke (2010). *Carte des périmètres d'urbanisation et des zones de développement*. Dans Ville de Sherbrooke, *Planification et aménagement du territoire*.

- http://www.ville.sherbrooke.qc.ca/webconcepteurcontent63/000023300000/upload/geomatique/cartes/urbanisme/u2196h1F_A0surdim.pdf (page consultée le 3 janvier 2010).
- Villeneuve, C. (2007). *Guide d'utilisation de la grille d'analyse de développement durable pour l'évaluation de projets*. Dans Chaire d'éco-conseil, Documents. http://ecoconseil.uqac.ca/chaire/documents/analyse_dev_dur_2007.pdf (page consultée le 2 mai 2010).
- Vipulanandan, C. et Pasari, G. (2005). Life Cycle Cost model (LCC-CIGMAT) for wastewater systems. Dans *ASCE Pipeline Division Specialty Conference - PIPELINES 2005*. American Society of Civil Engineers, Reston, États-Unis, p. 740-751.
- Von Hauff, M. et Kleine, A. (2006). Methodological approach for the systematisation of the areas of action and the indicators of a sustainability strategy: the integrative sustainability triangle. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 5, no. 4, p. 372-394.
- Von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds*. IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni, 162 p.
- Warrow, A. (2011). *Communication personnelle*, 26 avril 2011.
- Weaver, P., Jansen, L., van Grootveld, G., van Spiegel, E. et Vergragt, P. (2000). *Sustainable technology development*. Greenleaf Publishing, Sheffield, Royaume-Uni, 304 p.
- WEF (2004). *Financing and charges for wastewater systems*. Water Environment Federation. McGraw-Hill, New York, États-Unis, 280 p.
- Weiss, P., Eweborn, D., Kärmann, E. et Gustafsson, J.P. (2008). Environmental systems analysis of four on-site wastewater treatment options. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 10, p. 1153-1161.
- Welsh, M.P. et Poe, G.L. (1998). Elicitation Effects in Contingent Valuation: Comparisons to a Multiple Bounded Discrete Choice Approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 36, no. 2, p. 170-185.
- Whittington, D., Cassidy, G., Amaral, D., McClelland, E., Wang, H. et Poulos, C. (1994). *The Economic Value of Improving the Environmental Quality of Galveston Bay* (Publication GBNEP-38). The Galveston Bay National Estuary Program, Galveston, États-Unis, s.p.
- Wilson, S.J. (2000). *Case Study: The Costs and Benefits of Sewage Treatment and Source Control for Halifax Harbour*. GPI Atlantic, Glen Haven, Canada, 62 p.
- Woodruff, P.H. (2006). Educating Engineers to Create a Sustainable Future. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 132, no. 4, p. 434-444.
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford, Royaume-Uni, 383 p.

World Federation of Engineering Organizations (2004). *The Shanghai Declaration on Engineering and the Sustainable Future*. Dans WFEO, *Documents*, <http://www.wfeo.net/default.aspx.html> (page consultée le 10 juin 2008).

Yassine, A.A., Chelst, K.R. et Falkenburg, D.R. (1999). A decision analytic framework for evaluating concurrent engineering. *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 46, no. 2, p. 144-157.