



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie civil

**ÉLABORATION D'UN SYSTÈME D'ALERTE AUX ÉTIAGES À L'ÉCHELLE DU
BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE YAMASKA AU QUÉBEC**

**Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil**

Chantal ZEESTRATEN

**Jury : Bertrand CÔTÉ, directeur
Robert LECONTE, co-directeur
Jay LACEY, rapporteur
Sylvain PRIMEAU, correcteur externe**

Sherbrooke (Québec) Canada

Août 2012

IV-2261



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: 978-0-494-93338-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-93338-1

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

Résumé

Diverses études hydrologiques suggèrent que les changements climatiques anticipés entraîneront une diminution des débits d'étiage pour une majorité des rivières du sud du Québec. Cette situation risque de devenir particulièrement préoccupante dans le bassin versant de la rivière Yamaska, car son débit estival est déjà faible. Puisque cette rivière est la principale source d'approvisionnement en eau pour différentes municipalités et les industries qu'elles desservent, des actions doivent être entreprises avant d'en arriver à des situations critiques. Un système d'alerte basé sur des débits seuils jumelé à une prévision météorologique constituerait un outil de gestion puissant.

L'élaboration d'un tel système d'alerte nécessite une bonne connaissance de la rivière. Des analyses statistiques des différents épisodes d'étiage survenus dans les années passées permettent d'en faire ressortir les débits historiques ainsi que d'en comprendre le comportement en tarissement. Une revue bibliographique et l'analyse de différents modèles de prévision des débits permettent de déterminer les modèles qui s'appliquent le mieux au bassin de la rivière Yamaska. Des mesures de restriction pour chacun des différents niveaux du système d'alerte proposé doivent être déterminées en s'inspirant des différentes mesures de restriction présentes dans différents pays, tout en tenant compte des facteurs économiques et politiques. Aussi, les critères écologiques et fonctionnels doivent être pris en compte lors de l'établissement de ces débits seuils.

Sur la base d'un suivi d'indicateurs et de prévisions associées, ce mémoire propose donc un système d'alerte qui indiquera le moment où des mesures restrictives de prélèvement et de consommation doivent commencer à être appliquées. En plus de constituer un outil puissant pour le bassin versant de la rivière Yamaska, ce prototype de système d'alerte aux étiages pourra être adapté à d'autres bassins versants du Québec enclins aux étiages sévères.

Mots clés

Tarissement, prévision des étiages, mesures de restriction, prélèvements excessifs, économie d'eau potable

Remerciements

Cette étude n'aurait pu avoir lieu sans le constant soutien et les multiples idées du professeur Bertrand Côté, directeur de ce mémoire, que je remercie sincèrement. Je remercie également mon codirecteur, le professeur Robert Leconte, pour ses conseils et son intérêt qui m'ont permis de bien orienter le projet.

Je désire aussi offrir mes remerciements à toute l'équipe de recherche en hydraulique de l'Université de Sherbrooke qui m'a offert un soutien tout au long du projet, ainsi qu'aux différents partenaires du projet qui ont permis l'évolution des idées et concepts pour en arriver à ces résultats.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Ouranos qui finance le projet, grâce à la collaboration du gouvernement du Canada et du gouvernement du Québec dans le cadre des programmes pour permettre l'adaptation par rapport aux changements climatiques.

Table des matières

CHAPITRE 1	Introduction.....	1
1.1	Contexte global	1
1.2	Situation problématique	3
1.3	Objectifs	4
1.4	Contributions originales	5
1.5	Plan du document	6
CHAPITRE 2	État de l'art.....	7
2.1	Les systèmes d'alerte existants.....	7
2.1.1	EPIDOR (Établissement Public Territoriale du Bassin de la Dordogne)	7
2.1.2	SMÉAG (Syndicat Mixte d'Étude et d'Aménagement de la Garonne).....	9
2.2	Les indices d'étiage	11
2.2.1	Méthode du Montana (méthode de Tennant)	12
2.2.2	NEFM (New England Flow Method).....	12
2.2.3	Méthode « 0,25 QMA »	13
2.2.4	Fréquence de dépassement de 90 % et 95 % (Q_{90} et Q_{95}).....	13
2.2.5	Indices statistiques de faibles débits (7Q2, 7Q10 et 30Q5).....	14
2.2.6	Méthode échohydrologique	14
2.2.7	Résumé et usages des différents indices.....	15
2.3	Lois de distribution.....	17
2.3.1	Ajustement des distributions selon différentes fonctions	18
2.3.2	Critère de sélection.....	19
2.4	Les modèles de prévision des débits d'étiage.....	20
2.4.1	Méthode des k plus proches voisins.....	20
2.4.2	Tarissement.....	20
CHAPITRE 3	Développement.....	26
3.1	Description du bassin versant	26
3.2	Hydraulicité générale du bassin.....	31
3.3	Vulnérabilité	33
3.4	Choix de la meilleure loi de distribution	39
3.5	Adaptation pour Bromont et Granby.....	42
3.6	Détermination des indices d'étiage servant de débits seuils	44
3.6.1	Calcul des indices aux différentes stations	44
3.6.2	Niveaux d'alerte proposés	46
3.6.3	Viabilité des niveaux d'alerte proposés.....	48
3.7	Proposition de méthodes de prévision des débits.....	51
3.7.1	Analyse du tarissement à l'aide de la méthode des moindres carrés.....	51
3.7.2	Analyse de la méthode des k plus proches voisins.....	55

3.8	Continuité entre les différentes stations	59
3.8.1	Analyse de l'addition de différentes branches de la rivière	59
3.8.2	Analyse des débits spécifiques	63
3.9	Détermination des mesures de restriction	67
3.10	Effet anticipé des mesures de restriction	71
3.11	Guide des bonnes pratiques de consommation	75
3.12	Relation entre la qualité de l'eau et la quantité	78
3.13	Partage du système d'alerte	80
CHAPITRE 4	Conclusion	85
4.1	Synthèse des résultats.....	85
4.2	Contributions apportées	86
4.3	Travaux futurs	87
Annexe A : Les indices d'étiage pour les différentes stations		89
Annexe B : Les niveaux d'alerte proposés pour les différentes stations.....		93
Annexe C : Le nombre de jours sous chacun des niveaux d'alerte.....		96
Annexe D : Les mesures de restriction proposées pour chacun des niveaux d'alerte		101
Annexe E : Les données de production des prises d'eau municipales		105
Liste des références		106

Liste des figures

Figure 1.1 Localisation du bassin versant de la rivière Yamaska	1
Figure 2.1 Exemple de bulletin d'EPIDOR	9
Figure 2.2 Prévision du jour du SMEAG	10
Figure 2.3 Exemple de séquence de tarissement et de la droite extrapolée	22
Figure 2.4 Débit du jour 1 en fonction du jour 0 et jour 2 selon le jour 0.....	22
Figure 2.5 Détermination de l'� maître	23
Figure 3.1 Utilisation du sol (source : OBV Yamaska).....	26
Figure 3.2 Localisation du bassin versant	27
Figure 3.3 Emplacement des principales sources ponctuelles de pollution dans le bassin versant de la rivière Yamaska (source : MDDEP).....	28
Figure 3.4 Localisation des réserves d'eau	30
Figure 3.5 La pluviométrie du bassin versant	31
Figure 3.6 Les débits spécifiques des différentes stations	32
Figure 3.7 Vulnérabilité pour la protection de l'habitat aquatique.....	37
Figure 3.8 Les indices d'étiage à la station 030314	46
Figure 3.9 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314.....	47
Figure 3.10 Débit estival à la station 030314 en 2001.....	48
Figure 3.11 Débit estival à la station 030314 en 2010.....	49
Figure 3.12 L'erreur associée aux prévisions	53
Figure 3.13 Exemple de prévision 7 jours des débits	58
Figure 3.14 Débits � Farnham vs la somme des 3 stations en amont en 2006	60
Figure 3.15 Débit � St-Hyacinthe vs la somme des débits à Farnham et de la Rivière Noire en 2009	61
Figure 3.16 Débit � St-Hyacinthe vs la somme des débits à Farnham et rivière Noire en 2009 en tenant compte des prélèvements.....	62
Figure 3.17 Les QMA, 7Q2 et 7Q10 en débit spécifique.....	63
Figure 3.18 Hiérarchisation des mesures de restriction.....	67
Figure 3.19 Relation entre le débit et la température de l'eau.....	78
Figure 3.20 Relation entre le débit et le pH de l'eau.....	79
Figure 3.21 Aperçu de la page d'accueil du site web pilote	81
Figure 3.22 Aperçu des prévisions du jour pour Cowansville le 22 mai 2012	82
Figure 3.23 Aperçu de l'historique de Cowansville	83
Figure 3.24 Aperçu de la situation observée en 2010 à Cowansville	84
Figure A.1 Les indices d'étiage à la station 030301	89
Figure A.2 Les indices d'étiage à la station 030302	89
Figure A.3 Les indices d'étiage à la station 030304	90
Figure A.4 Les indices d'étiage à la station 030309	90
Figure A.5 Les indices d'étiage à la station 030314.....	91
Figure A.6 Les indices d'étiage aux stations 030341 et 030345	91
Figure A.7 Les indices d'étiage à la station 030351	92

Figure B.1 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030302.....	93
Figure B.2 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030304.....	93
Figure B.3 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314.....	94
Figure B.4 Les niveaux d'alerte proposés aux stations 030341 et 030345.....	94
Figure B.5 Les niveaux d'alerte proposés à Granby (prise d'eau).....	95
Figure B.6 Les niveaux d'alerte proposés à Bromont (prise d'eau).....	95

Liste des tableaux

Tableau 2.1 La méthode de Tennant	12
Tableau 2.2 Résumé des débits réservés pour la Montérégie	15
Tableau 2.3 Indices et usages des différents débits d'étiage ou débits réservés	15
Tableau 3.1 Caractéristiques des stations hydrométriques à l'étude	27
Tableau 3.2 Caractéristiques des réserves d'eau	29
Tableau 3.3 Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel.....	35
Tableau 3.4 Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel (Bromont et Granby).....	36
Tableau 3.5 Vulnérabilité selon la pointe journalière	37
Tableau 3.6 Vulnérabilité selon la pointe journalière (Bromont et Granby).....	37
Tableau 3.7 Lois de distribution pour les indices 7Q2 et 7Q10.....	40
Tableau 3.8 Lois de distribution pour l'indice 30Q5	41
Tableau 3.9 Les indices d'étiage (m ³ /s)	45
Tableau 3.10 Nombre d'année sous chacun des niveaux d'alerte	50
Tableau 3.11 Exemple d'historique des débits.....	56
Tableau 3.12 Ajustement des débits pour la méthode des k plus proches voisins.....	57
Tableau 3.13 Les indices d'étiage en débit spécifique (l/s/km ²)	64
Tableau 3.14 Les indices d'étiage en débit spécifique (l/s/km ²) (suite)	65
Tableau 3.15 Exemples de mesures de restriction	68
Tableau 3.16 Exemples de mesures de restriction (suite).....	69
Tableau 3.17 Effet des mesures de restriction	71
Tableau 3.18 Effet du système d'alerte pour Cowansville	72
Tableau 3.19 Effet du système d'alerte pour St-Hyacinthe	73
Tableau 3.20 Effet du système d'alerte pour Farnham	73
Tableau C.1 Station 030302	96
Tableau C.2 Station 030314	98
Tableau C.3 Stations 030341 et 030345	99
Tableau C.4 Prise d'eau de Bromont	99
Tableau C.5 Prise d'eau de Granby	100
Tableau D.1 Mesures pour l'usage domestique privé	101
Tableau D.2 Mesures pour l'usage domestique collectif	102
Tableau D.3 Mesures pour l'usage agricole.....	103
Tableau D.4 Mesures pour l'usage industriel	104
Tableau D.5 Mesures pour d'autres usages	104
Tableau E.1 Production des prises d'eau	105

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte global

Diverses études hydrologiques suggèrent que les changements climatiques anticipés entraîneront une diminution des débits d'étiage pour une majorité des rivières du sud du Québec [Mailhot *et al.*, 2008]. Les experts s'entendent aussi pour dire que les événements extrêmes (crues et étiages) auront une fréquence et une amplitude accrues. Cette situation prévue contraint les gestionnaires à être proactifs quant à la gestion de l'eau en période d'étiage [Mailhot

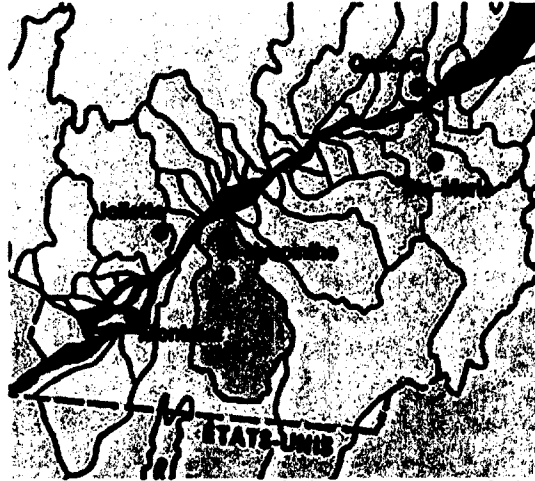


Figure 1.1 Localisation du bassin versant de la rivière Yamaska

et al., 2008]. La situation risque de devenir particulièrement préoccupante pour le bassin versant de la rivière Yamaska (figure 1.1 [Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs Québec, 1997]), car son débit estival est déjà faible. À plusieurs reprises, au cours des dernières années, les faibles précipitations et les températures élevées ont entraîné une baisse importante des débits dans la rivière Yamaska et dans ses principaux tributaires. De tels épisodes sont fortement susceptibles d'augmenter en fréquence et en sévérité dans le futur [Cyr, 2012].

Une diminution de la quantité d'eau dans cette rivière peut devenir problématique pour plusieurs municipalités, les industries qu'elles desservent et des entreprises agricoles qui utilisent cette source d'approvisionnement en eau potable et en eau brute. Aussi, la qualité de l'eau risque d'être moindre dans le cas où les mêmes concentrations de contaminants sont rejetées des stations d'épuration dans une quantité d'eau moindre pour la dilution. Certaines activités récréatives, tels le canoë et la pêche, peuvent aussi ressentir les effets de la baisse des débits puisque ces conditions favorisent également les proliférations

excessives de cyanobactéries [OBV Yamaska, 2010]. Un débit insuffisant peut donc toucher l'ensemble des activités liées à la rivière. Certains des exploitants sont capables de trouver une solution pour s'adapter, mais cette situation aura tout de même une incidence importante. Par exemple, les coûts engendrés pourront être répartis sur l'ensemble des citoyens indirectement. Il pourrait y avoir des impacts sur la production d'eau potable, des pertes environnementales, des pertes commerciales (ex. piscines) et des restrictions d'irrigation causant l'augmentation du prix des denrées.

Parfois, des industries parviennent à trouver des mesures qui leur permettent de prévenir partiellement les problèmes liés à l'étiage. La mise en place de réservoirs ou d'autres moyens de stockage et l'utilisation de technologies innovantes permettant une diminution de la quantité d'eau utilisée sont parmi les moyens utilisés. Par contre, certains problèmes sont plus difficiles à gérer et restent critiques en cas d'une forte diminution du débit, notamment les pollutions accidentelles qui peuvent survenir dans les cours d'eau. Aussi, certaines des mesures mises en place pour diminuer les effets de l'étiage sont ponctuelles.

Il devient donc important d'étudier la mise en place de mesures de gestion qui protégeraient, aujourd'hui et dans le futur, l'approvisionnement en eau potable des usagers en périodes anticipées d'étiage. Un système d'alerte basé sur des débits seuils jumelé à une prévision météorologique constituerait un outil de gestion puissant pour établir un plan d'intervention en cas de dépassements de seuils critiques. Aussi, un tel système peut être utilisé pour évaluer la vulnérabilité de la rivière Yamaska face aux changements climatiques et pour identifier des avenues d'adaptation.

Sur la base d'un suivi d'indicateurs et de prévisions associées, le système d'alerte indiquera le moment où des mesures restrictives de prélèvement et de consommation doivent commencer à être appliquées. La présente étude vise à utiliser différentes techniques d'analyse de séquences historiques de débits afin de quantifier la sévérité des étiages historiques et de les relier à un nombre restreint d'indicateurs hydro-climatiques, dans le but d'établir un modèle de prévision des débits d'étiage.

1.2 Situation problématique

Pour la plupart des rivières du sud du Québec, peu ou aucune mesure, telles que des restrictions sur l'arrosage, n'est mise en place pour restreindre la consommation d'eau pendant la saison estivale. Pour la rivière Yamaska, certaines mesures sont appliquées, mais sans toutefois être directement reliées au niveau et au débit de la rivière. Il s'agit habituellement d'une réglementation qui est appliquée durant la saison estivale. Cette réglementation ne permet pas toujours un contrôle efficace de la consommation d'eau lors de périodes d'étiage sévères. La présence de barrages aide aussi à conserver un débit d'eau stable dans certaines branches de la rivière, mais nécessite des règles de gestion pour être efficace. Le barrage Choinière et le barrage du lac Brome font l'objet d'une telle gestion. Certains autres barrages ne font toutefois pas l'objet d'une gestion et servent principalement à retenir une réserve d'eau pour la submersion des prises d'eau des municipalités.

En cas de diminution importante des débits d'eau dans la rivière Yamaska, certaines situations extrêmes peuvent devenir très problématiques pour la survie de la faune et la flore aquatique. La dilution des contaminants rejetés par les stations d'épuration peut devenir moins efficace et ainsi, la qualité de l'eau peut être compromise. Les usines de filtration peuvent aussi rencontrer certaines difficultés au niveau du traitement de l'eau brute. Plus de réactifs et des procédés plus complexes peuvent être nécessaires, ce qui engendre des coûts plus élevés pour la production d'eau potable. Toutes ces situations engendrent des impacts environnementaux sur la vie aquatique ainsi que des impacts économiques sur la société. Pour prévenir que de tels problèmes surviennent, l'idée de développer et d'instaurer un système d'alerte a été mise de l'avant. Il devient donc important de définir les caractéristiques d'un système d'alerte qui permettrait de prévenir les débits d'étiage trop sévères.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'élaborer un système d'alerte aux débits d'étiage et aux prélèvements excessifs pour le bassin versant de la rivière Yamaska. Ce système sera un outil intéressant pour la gestion de la ressource en eau pour chacune des municipalités. Ce système d'alerte sera composé de débits seuils correspondants à différents niveaux d'alerte. Cet ensemble de débits seuils doit être basé sur des critères correspondants aux exigences du MDDEP et aux exigences de chacune des municipalités prélevant de l'eau dans la rivière.

Pour déterminer ces débits, une étude du réseau hydrographique et des prises d'eau est nécessaire. Le comportement de la rivière en l'absence de précipitation doit être compris, tout autant que les réactions du bassin versant lors de précipitations. Il faut déterminer les facteurs écologiques qui sont prioritaires dans chacune des branches de la rivière et aussi connaître et comprendre le fonctionnement des prises d'eau.

Le système d'alerte doit aussi comporter une prévision des débits des prochains jours pour anticiper le degré de sévérité des étiages qui risquent d'être observés. Pour ce faire, un modèle de prévision des débits s'appliquant à la rivière Yamaska doit être proposé.

Le système d'alerte doit comprendre des mesures de restrictions pour chacun des niveaux afin de réduire les prélèvements d'eau. La détermination de ces mesures doit être faite en tenant compte de la faisabilité, autant que des enjeux politiques et économiques. Pour tenir compte de la viabilité politico-économique, une évaluation de la fréquence des mesures de restriction est faite à partir des années passées.

1.4 Contributions originales

Le but de ce projet est avant tout l'élaboration d'un prototype de système d'alerte aux étiages pour le bassin de la rivière Yamaska, qui pourra ensuite servir de modèle. Ce projet est développé pour les municipalités de St-Hyacinthe, Granby, Bromont, Cowansville et Farnham, mais il pourra être adapté pour différents autres bassins versants du sud du Québec et même d'ailleurs. En effet, aucun système de ce type n'existe présentement au Québec et ce prototype de système d'alerte aux étiages est donc le premier à être mis en place au Québec. Avec les changements climatiques qui prennent de plus en plus de place dans les préoccupations environnementales, une meilleure gestion de la ressource en eau lors des périodes estivales est nécessaire et peut être rendue possible grâce à un système d'alerte aux étiages.

Ce système d'alerte sert d'outil de gestion pour le contrôle des étiages de la rivière Yamaska et permettra de mieux s'adapter aux changements climatiques qui sont anticipés. L'eau ayant trop souvent été considérée comme une ressource inépuisable, des mesures telles qu'un système d'alerte et des restrictions sont nécessaires pour sensibiliser la population et permettre de profiter de façon durable des rivières, en tenant compte du risque de diminution de débits dans la rivière avec les changements climatiques.

Ce mémoire présente une proposition d'indice d'étiage servant à déterminer les différents niveaux du système. La détermination d'une façon optimale d'utiliser la méthode de prévision du tarissement menant à une prévision pessimiste, donc « sécuritaire » du point de vue du système d'alerte proposé, est aussi présentée dans ce projet.

1.5 Plan du document

Ce mémoire fait tout d'abord mention de différents systèmes d'alerte existants en Europe dans la section « État de l'art ». Les différents indices d'étiage existants et s'appliquant au Québec sont ensuite détaillés, ainsi que les lois de distribution qui permettent de les analyser. Différentes méthodes de prévision des débits existantes dans la littérature sont aussi présentées.

Dans la section « Développement » de ce rapport, une description du bassin versant et de son hydraulique est présentée. L'analyse de la vulnérabilité, l'analyse des indices d'étiage et l'élaboration du système d'alerte et des mesures de restriction associées y sont aussi exposées. Une analyse de la qualité et certaines recommandations quant à la gestion du système d'alerte complètent cette section. Plusieurs informations, telles que la section 3.6 présentant les différents niveaux d'alerte, peuvent avoir une très grande utilité pour les gestionnaires des stations de filtration.

Dans la section « Conclusion », une synthèse des résultats et des contributions apportées par ce projet, ainsi que des recommandations pour de futurs travaux sur ce sujet sont dévoilées.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

De nombreuses études et recherches ont été faites concernant les phénomènes extrêmes des rivières. La majorité de ces travaux ont permis de mieux comprendre les crues, mais peu de recherches ont été effectuées au sujet des étiages. Certaines recherches ont tout de même apporté des éléments intéressants pour ce projet. C'est le cas des systèmes d'alerte qui sont présents à travers le monde, ainsi que les études qui ont servi à définir différents indices d'étiage et les enjeux écologiques correspondants.

2.1 Les systèmes d'alerte existants

Principalement en Europe, mais aussi aux États-Unis et ailleurs dans le monde, certains systèmes d'alerte aux étiages ont été développés et sont appliqués à des bassins versants sujets aux étiages sévères. Ces systèmes d'alerte reposent sur des débits seuils à partir desquels des consignes de restriction des prélèvements d'eau sont imposées. Ces seuils correspondent à des débits objectifs d'étiage qui sont déterminés en tenant compte des critères fonctionnels et écologiques.

2.1.1 EPIDOR (Établissement Public Territoriale du Bassin de la Dordogne)

En France, le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) définit la base d'une gestion équilibrée de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques à l'échelle du bassin versant. Des organismes, tels que le SMÉAG (Syndicat Mixte d'Étude et d'Aménagement de la Garonne) et l'EPIDOR (Établissement Public Territoriale du Bassin de la Dordogne), sont en charge de chacun de ces bassins versants et doivent appliquer un plan de gestion en accord avec le SDAGE. L'EPIDOR est l'institution interdépartementale pour la mise en valeur de la Vallée de la Dordogne qui est responsable de plusieurs départements de cette région. Elle a pour mission de favoriser un développement harmonieux de la vallée de la Dordogne selon les aspects suivants [EPIDOR, 2012] :

- Assurer la protection et la restauration de son environnement.

- Améliorer la ressource en eau sur les plans de la qualité, de la quantité et de la gestion de la Dordogne et de ses affluents.
- Assurer un développement cohérent des activités économiques liées à la rivière Dordogne.
- Dans le domaine du tourisme, assurer la promotion et développer le label "Dordogne".

Pour arriver aux objectifs qui sont mis de l'avant, des mesures progressives et significativement efficaces s'appliquent à 3 niveaux de débit [EPIDOR, 2008] :

Débit Objectif d'Étiage (DOE) : débit permettant l'atteinte du bon état des eaux et la satisfaction de l'ensemble des usages. Mesures de vigilance;

Débit d'Alerte (Qa) : débit correspondant au tiers inférieur entre le DOE et le DCR. Lorsque le débit moyen journalier est inférieur à ce débit d'alerte durant 3 jours consécutifs, au moins 50 % des prélèvements sont suspendus (interdiction de prélever 4 jours sur 7 ou réduction du débit de prélèvement de 50 %);

Débit de Crise (DCR) : débit moyen journalier inférieur aux valeurs du DCR durant 2 jours consécutifs. Tous les prélèvements sont interdits (sauf les usages prioritaires tels que l'eau potable).

Un bulletin est diffusé hebdomadairement pour communiquer la situation présente aux usagers de l'eau. La figure 2.1 suivante présente un exemple de situation observée pour la semaine du 6 au 11 septembre 2010 [EPIDOR, 2010].

Cette communication permet aux usagers de suivre l'état de la rivière et d'adapter les prélèvements en conséquence. Cette information est facilement disponible sur le site web de EPIDOR et accessible à toute la population.

OBSERVATION DES COURS D'EAU AU COURS DE L'ETIAGE 2010

Semaine du 6 au 11 septembre
Dernières observations

- Ecoulement visible acceptable
- Ecoulement faible
- Absence d'écoulement
- Rivière à sec



Source: EPIDOR, SD Carthage - ASAG, Réseaux: EPIDOR 06 2010

Au cours de l'étiage, le niveau des cours d'eau baisse. Cette carte donne un éclairage sur un certain nombre de points du bassin, qui sont alors régulièrement suivis autour de cette période. Adaptons nous à une eau qui peut devenir rare....

EPIDOR



Établissement Public Territorial du Bassin
DORDOGNE



Figure 2.1 Exemple de bulletin d'EPIDOR

2.1.2 SMÉAG (Syndicat Mixte d'Étude et d'Aménagement de la Garonne)

Les systèmes existants comprennent typiquement trois ou quatre niveaux d'alerte, allant du premier, qui fait appel à des restrictions volontaires, au dernier, correspondant à un niveau de crise qui nécessite des restrictions plus sévères. Pour quelques-uns de ces systèmes d'alerte, un portail informatique est mis en place pour permettre à la population concernée de visualiser la situation en temps réel ou à intervalle régulier, comme dans le cas de EPIDOR présenté précédemment. La figure 2.2 présente un exemple de portail qui présente l'information quotidiennement [SMEAG EPTB-Garonne, 2011]. On retrouve aussi, sur la majorité de ces portails, de l'information sur la qualité de l'eau, les prévisions des débits pour les 3 à 7 prochains jours ainsi que les mesures qui doivent être apportées à chacun des niveaux de restriction et d'interdiction. Ces niveaux d'alerte sont déterminés en étudiant l'historique des stations hydrométriques et en effectuant des analyses statistiques sur ces

données. Habituellement, en Europe, le débit mensuel minimal d'une année (QMNA) est la référence pour déterminer les niveaux d'alerte [Lang et al., 2006]. Cette valeur est déterminée à l'aide de la moyenne du mois calendrier et des récurrences de 2 ans, 5 ans et 10 ans sont habituellement considérées.

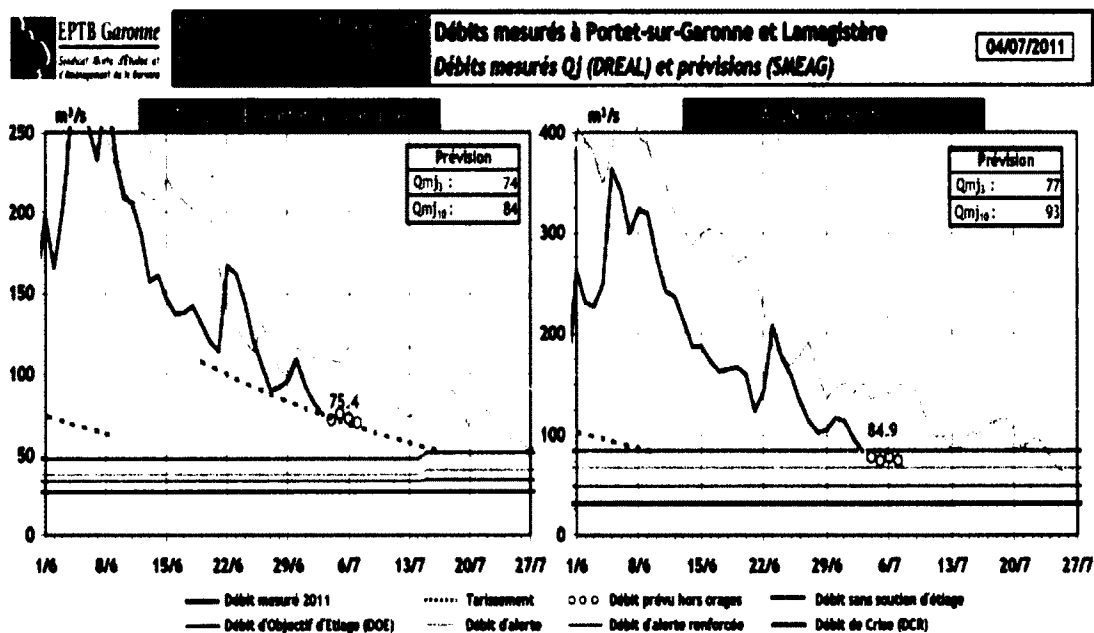


Figure 2.2 Prévision du jour du SMEAG

Le QMNA n'est pas étudié dans le cadre de ce projet, à cause de la variabilité des débits dans un même mois. Les débits qui sont obtenus à l'aide de cette méthode risquent d'être très élevés et ne pas répondre aux besoins des municipalités et des différents usagers de l'eau pour le système d'alerte de la rivière Yamaska.

2.2 Les indices d'étiage

Plusieurs critères sont à prendre en considération lors de l'analyse des débits d'étiage et des débits réservés, ces derniers étant particulièrement destinés à des fins écologiques. Le débit réservé représente le débit nécessaire dans un cours d'eau pour permettre la protection de l'habitat des espèces de poissons présentes. La dilution des rejets contaminés, la protection de l'habitat aquatique, la protection des prises d'eau, le maintien des activités nautiques sont quelques exemples de contraintes qui doivent aussi être analysées. Pour déterminer la valeur des débits d'étiage dans les rivières, il existe plusieurs méthodes qui ont été développées dans différents pays, dont au Canada et aux États-Unis.

Les méthodes hydrologiques sont celles qui sont les plus simples et les moins coûteuses, car elles ne nécessitent pas de relevés de terrain [Belzile *et al.*, 1997]. Elles sont plutôt basées sur l'analyse statistique de l'historique des mesures des débits sur une longue période d'observation (habituellement 20 ans ou plus).

Les méthodes hydrauliques étudient la relation entre les caractéristiques physiques de l'habitat aquatique (le niveau d'eau, la largeur de la rivière, le périmètre mouillé, etc.) et le débit de la rivière à cet endroit [Belzile *et al.*, 1997].

Les méthodes d'habitat sont semblables aux méthodes hydrauliques, mais en tenant compte d'une espèce spécifique, d'une saison ou d'une période choisie ainsi qu'en considérant les réactions biologiques. Ces méthodes s'appliquent particulièrement bien lors de l'évaluation des impacts potentiels d'un projet sur un segment de rivière précis [Belzile *et al.*, 1997].

Les méthodes hydrologiques sont celles qui ont été retenues et qui sont utilisées au cours de cette étude. La principale est la simplicité de l'obtention des données, qui sont toutes disponibles sur le site du Centre d'Expertise Hydrique du Québec [Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2010]. De plus, ces données sont disponibles presque en temps réel, il y a peu de décalage temporel entre la prise de donnée et leur utilisation. Ces méthodes sont aussi très bien documentées dans la littérature.

2.2.1 Méthode du Montana (méthode de Tennant)

La méthode du Montana, qui est communément appelée Méthode de Tennant, est la méthode hydrologique de détermination des débits écologiques la plus fréquemment utilisée aux États-Unis, au Canada et même à travers le monde [Tharme, 2003]. Elle a été principalement développée pour les cours d'eau du centre-nord américain. La seule donnée requise est le débit moyen annuel (QMA), ce qui en fait une méthode très simple. Un pourcentage du QMA est utilisé pour classer la condition générale de la rivière. Huit classes de débit (tableau 2.1) se retrouvent pour chacune des deux grandes périodes de l'année (octobre à mars et avril à septembre). Un débit réservé équivalent à 30% du débit moyen annuel semble généralement convenable pour la période estivale et est habituellement la valeur utilisée pour la protection de l'habitat des poissons [Belzile *et al.*, 1997].

Tableau 2.1 La méthode de Tennant

Cote d'appréciation	Régime recommandé (% du QMA)	
	Octobre à mars	Avril à septembre
Crue ou maximum	200 %	200 %
Plage optimale	60 % - 100 %	60 % - 100 %
Remarquable	40 %	60 %
Excellent	30 %	50 %
Bon	20 %	40 %
Passable	10 %	30 %
Pauvre ou minimum	10 %	10 %
Détérioration sévère	<10 %	<10 %

2.2.2 NEFM (New England Flow Method)

Cette méthode a été développée pour les rivières du nord-est des États-Unis et a été adaptée à des cours d'eau de la Caroline du Nord et de la Virginie [Belzile *et al.*, 1997]. La valeur qui sert de débit critique est la médiane du mois où se produisent le plus souvent les débits d'étiage et où les températures sont les plus élevées. Ce mois correspond habituellement au mois d'août, et parfois au mois de septembre, dépendamment des

régions, et le débit est représenté par l'indice « Q_{50} août » ou « Q_{50} septembre ». Défini comme le débit réservé de base (Aquatic Base Flow ou ABF), ce débit protège les habitats aquatiques [Belzile *et al.*, 1997; Russell, 1990]. Cette méthode s'applique toutefois aux bassins versants ayant une superficie de plus de 130 km². Dans notre cas, ou en l'absence de données historiques, un débit de 0,0055 m³/s/km² est recommandé pour le débit réservé de base [Caissie *et al.*, 2007].

2.2.3 Méthode « 0,25 QMA »

Cette méthode, qui est une adaptation de la méthode de Tennant, est fréquemment utilisée dans les provinces maritimes du Canada [Caissie et El-Jabi, 1995]. Le quart du débit moyen annuel (0,25 QMA) est la valeur qui est préconisée comme débit réservé par cette méthode et est très semblable à celle obtenue avec Tennant 30 % du QMA. Elle représente le débit minimal à conserver dans la rivière pour la protection de la vie aquatique, sans prendre en considération le moment de l'année, ni les types d'espèces qui s'y retrouvent.

2.2.4 Fréquence de dépassement de 90 % et 95 % (Q_{90} et Q_{95})

Quelque peu semblable à la méthode NEFM, la méthode des fréquences de dépassement utilise par contre toutes les valeurs de débits journaliers de la période analysée et non pas seulement celles du mois d'août ou septembre. Les données sont ensuite classées pour déterminer le débit dont 90% ou 95% des valeurs sont plus élevées ou égales. Il est aussi possible de représenter le Q_{90} comme étant le 90^{ième} centile de la courbe des débits classés et donc le Q_{95} comme étant le 95^{ième} centile de la courbe des débits classés. L'indice Q_{90} représente la limite de débit acceptable pour un débit de base. Cet indice est aussi utilisé comme avertissement aux gestionnaires de l'eau à Porto Rico et indique que des débits critiques sont à prévoir dans les prochains jours [Rivera-Ramirez *et al.*, 2002]. L'indice Q_{95} représente plutôt des débits d'étiage en conditions extrêmes et est la limite acceptable pour la protection de la rivière [Tharme, 2003; Petts *et al.*, 1999].

2.2.5 Indices statistiques de faibles débits (7Q2, 7Q10 et 30Q5)

Plusieurs études présentent les indices statistiques des faibles débits. Ces indices sont présentés sous la forme 7Q10 par exemple, c'est-à-dire le débit minimum moyen journalier calculé sur 7 jours et ayant une période de retour de 10 ans. Les indices 7Q2, 7Q10 et 30Q5 sont ceux utilisés par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs afin de fixer les objectifs environnementaux de rejet des stations d'épuration en fonction de l'azote ammoniacal, de la DBO5, du phosphore, etc. [Cloutier *et al.*, 2007]. On retrouve aussi différents autres indices dans la littérature tels que 7Q20 ou 30Q10, chacun ayant ses propres justifications écohydrologiques : seuil critique pour la dilution d'un rejet d'eaux usées, seuil pour la survie d'une espèce, etc. [Pyrce, 2004].

2.2.6 Méthode écohydrologique

Une autre étude [Belzile *et al.*, 1997] a permis de mettre sur pied une méthode visant à déterminer les débits réservés dans les rivières de la province de Québec. Cette méthode prend en considération les aspects écologiques, hydrologiques et géographiques des rivières de la province. Les débits réservés sont propres à chacune des régions « écologiques » et varient en fonction de la période de l'année.

La rivière Yamaska est située en partie dans la région de la Montérégie et les indices des débits réservés qui s'appliquent sont ceux obtenus pour la rivière Richelieu, qui a servi de témoin pour cette région. Les espèces de poissons essentiellement présents dans la région à l'étude sont le doré jaune et l'achigan à grande bouche. Les phases sensibles du cycle vital de ces espèces, qui sont la fraie, l'incubation et l'alimentation, se produisent principalement entre le début avril et la fin septembre. Pour la période du 1^{er} avril au 15 juillet, correspondant à la fraie et à l'incubation des œufs, le débit réservé est représenté par 50 % du débit moyen de cette période (0,5 QMP). Pour la période du 1^{er} mai au 30 septembre, correspondant à l'alimentation pour les espèces, le débit réservé est représenté par le débit médian du mois d'août (Q₅₀ août). En considérant l'année complète, le débit réservé peut

être représenté par 50 % du débit moyen annuel (0,5 QMA). Un résumé des débits réservés est présenté au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Résumé des débits réservés pour la Montérégie

Date	Situation	Débit réservé
Toute l'année		0.50 QMA
1 ^{er} avril au 15 juillet	Fraie et incubation des œufs du doré et de l'achigan	0.50 QMP
1 ^{er} mai au 30 septembre	Alimentation de toutes les espèces Migration de l'anguille d'Amérique	Q ₅₀ août

2.2.7 Résumé et usages des différents indices

Les diverses méthodes présentées précédemment exposent les indices de débits d'étiage qui s'appliquent à différentes régions et en tenant compte de différents facteurs tels l'habitat aquatique, la dilution des contaminants dans les cours d'eau, etc. Le tableau 2.3 présente un résumé des usages correspondant aux différents indices présentés par les différentes méthodes. L'analyse de ces différentes méthodes fait ressortir les différents indices d'étiage qui sont les plus appropriés à la situation des rivières du sud du Québec.

Tableau 2.3 Indices et usages des différents débits d'étiage ou débits réservés

Indices	Usages	Références
7Q2	Critère de protection de la vie aquatique chronique (MES, DBO5)	[Cloutier <i>et al.</i> , 2007]
	Critère de protection de la vie aquatique chronique (phosphore), eutrophisation en lac, en réservoir ou en baie fermée	
7Q2	Utilisé comme un débit réservé	[Belzile <i>et al.</i> , 1997]
7Q2	Critère d'activités récréatives et d'esthétique (Coliformes fécaux)	[Cloutier <i>et al.</i> , 2007]
	Critère de protection de la vie aquatique chronique (phosphore), eutrophisation en rivière	
7Q2	Débit pour la maintenance de l'habitat (représente une période de stress sur le système qui provoque une certaine réduction des populations)	[Pyrce, 2004]

¹ La période estivale se situe entre le 1^{er} juin et le 31 octobre selon le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). Dans le cadre de cette étude, la période estivale est considérée du 1^{er} mai au 31 octobre.

7Q10	L'un des indices les plus utilisés pour déterminer les débits d'étiage et les débits réservés	[Tharme, 2003; Abi-Zeid et Bobée, 1999; Caissie <i>et al.</i> , 1998]
7Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique (contaminants toxiques)	[Cloutier <i>et al.</i> , 2007]
7Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique (azote ammoniacal)	[Cloutier <i>et al.</i> , 2007]
7Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique (à l'exception de l'azote ammoniacal) Critères de qualité de l'eau pour la toxicité NH ₃ -N : mai-novembre : pour la protection de la vie aquatique aiguë en été, décembre-février : pour la protection de la vie aquatique aiguë en hiver	[Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water, 1997]
7Q20	Utilisé comme un débit créant l'extinction du système (cause de stress importante sur le système)	[Pyrce, 2004]
7Q20	Utilisé comme un indicateur du débit minimal nécessaire pour le maintien de l'écosystème	[Pyrce, 2004]
30Q5	Critère de prévention de la contamination de l'eau et des organismes aquatiques Critère de protection de la faune terrestre piscivore	[Cloutier <i>et al.</i> , 2007]
30Q10	Critère de qualité de l'eau pour la toxicité NH ₃ -N : mai-novembre : pour la protection de la vie aquatique chronique en été, décembre-février : pour la protection de la vie aquatique chronique en hiver	[Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water, 2008]
30Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique en ce qui concerne l'ammoniac ou des charges d'azote ammoniacal	[United States Environmental Protection Agency, 1999; United States Environmental Protection Agency, 1995]
Q ₅₀ août	Débit réservé de base (Aquatic Base Flow ou ABF) Protège l'habitat aquatique autant que sous un régime naturel	[Belzile <i>et al.</i> , 1997]
Q ₉₀	Débit mensuel offrant des conditions d'écoulement stables et moyennes	[Caissie et El-Jabi, 1995]
Q ₉₀	Avertissement aux gestionnaires de l'eau indiquant que des débits critiques sont à prévoir dans les prochains jours	[Rivera-Ramirez <i>et al.</i> , 2002]
Q ₉₅	Indicateur de conditions extrêmes de faible débit couramment utilisé	[Tharme, 2003]
Q ₉₅	Débit minimum pour protéger la rivière	[Petts <i>et al.</i> , 1999]

2.3 Lois de distribution

Pour déterminer les indices statistiques de faibles débits, les plus faibles valeurs des débits moyens de 7 ou 30 jours consécutifs sont calculées pour chacune des années de l'historique disponible à une station hydrométrique. L'ajustement de cet échantillon est ensuite effectué à l'aide d'une distribution statistique afin d'en faire ressortir les récurrences voulues. Il est toutefois primordial de vérifier si les données sont homogènes, indépendantes et stationnaires avant d'effectuer l'ajustement.

Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité à l'échelle annuelle de Wilcoxon permet de vérifier si la moyenne de deux sous-échantillons est différente. L'échantillon complet des observations est subdivisé en deux sous-échantillons égaux dont le premier est composé des données des observations à partir de l'année de début jusqu'à l'année de coupure et le deuxième sous-échantillon est composé des données des observations à partir de l'année de coupure jusqu'à la dernière année des observations [Bendat et Piersol, 1986].

Test d'indépendance

Le test d'indépendance de Wald-Wolfowitz est utilisé pour vérifier l'hypothèse que les éléments de la séquence sont mutuellement indépendants. Il permet de vérifier s'il existe une autocorrélation de premier ordre significative entre les observations [Bendat et Piersol, 1986].

Test de stationnarité

Le test de stationnarité de Kendall permet de vérifier s'il existe une tendance significative dans la série [Bendat et Piersol, 1986]. La stationnarité implique que la probabilité d'occurrence d'un événement est proportionnelle à la longueur d'un petit intervalle et indépendante du temps d'occurrence de l'événement lui-même [Abi-Zeid et Bobée, 1999].

2.3.1 Ajustement des distributions selon différentes fonctions

Différentes lois de distributions sont disponibles pour l'ajustement des échantillons. Celles qui sont retenues sont la loi de Weibull (équation 2.1), la loi de Gumbel (équation 2.2), la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV, équation 2.3) et la loi de log-Pearson 3 (LP3, équation 2.4). Ces différentes lois d'ajustement prennent en considération 2 ou 3 paramètres qui sont les paramètres de forme, d'échelle et de position. Ces lois sont fréquemment appliquées aux débits d'étiage et ont aussi été appliquées à différentes rivières américaines et canadiennes [Abi-Zeid et Bobée, 1999; Anctil *et al.*, 2000].

Weibull

$$f(x) = \frac{\eta}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)^{\eta} \quad (\text{éq. 2.1})$$

Avec β : paramètre d'échelle et η : paramètre de forme

Gumbel

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp\left[\frac{x-\alpha}{\beta} - \exp\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right] \quad (\text{éq. 2.2})$$

Avec α : paramètre de position et β : paramètre d'échelle

Loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV)

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left\{ 1 - k \frac{(x-u)}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{k}-1} \exp\left[- \left\{ 1 - k \frac{(x-u)}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{k}} \right] \quad (\text{éq. 2.3})$$

Avec α : paramètre d'échelle, k : paramètre de forme et u : paramètre de position

Log-Pearson 3 (LP3)

$$f(x) = \frac{1}{|a|x\Gamma(b)} \left(\frac{\ln(x) - c}{a} \right)^{b-1} \exp\left(-\frac{\ln(x) - c}{a} \right) \quad (\text{éq. 2.4})$$

Avec a : paramètre d'échelle, b : paramètre de forme et c : paramètre de position

2.3.2 Critère de sélection

Pour déterminer la fonction de distribution qui représente le meilleur ajustement, le critère d'information d'Akaike (AIC) ou le critère d'information bayésien (BIC) peut être utilisé [Galbraith et Zinde-Walsh, 2004]. Une fonction de distribution est meilleure qu'une autre si son AIC (ou BIC) est plus petit. Ces critères de sélection sont présentés avec les équations 2.5 et 2.6 respectivement.

Critère d'information d'Akaike (AIC)

$$\text{AIC} = -2 \log(L) + 2k \quad (\text{éq. 2.5})$$

Où L est la vraisemblance et k le nombre de paramètres

Critère d'information bayésien (BIC)

$$\text{BIC} = -2 \log(L) + 2k \log(n) \quad (\text{éq. 2.6})$$

Où L est la vraisemblance, k le nombre de paramètres et n la taille de l'échantillon

Le critère d'information bayésien (BIC) est fréquemment utilisé pour identifier la fonction de distribution qui s'ajuste le mieux aux données étudiées, car ce critère donne de meilleurs résultats qu'AIC, ce dernier n'étant pas consistant selon différents auteurs [Lebarbier et Mary-Huard, 2004]. Pour l'étude, la meilleure fonction de distribution est donc déterminée comme celle obtenant la plus petite valeur du critère d'information bayésien.

2.4 Les modèles de prévision des débits d'étiage

Pour permettre une gestion optimale de la ressource en eau, une prévision des débits pour les 7 prochains jours est un complément essentiel pour le système proposé d'alerte aux étiages. Il existe plusieurs méthodes de prévision des débits à court terme tel que des modèles conceptuels et des modèles empiriques. Les modèles conceptuels reflètent, par leur structure interne, une conception du système modélisée [Fortin *et al.*, 1997]. Les modèles empiriques permettent de bien reproduire le comportement du système, sans pour autant reproduire la structure interne du système. Parmi ceux-ci, le modèle empirique de la *méthode des k plus proches voisins* fait partie des outils retenus dans le cadre de cette étude, tout comme le tarissement qui peut aussi servir d'outil de prévision des débits en tenant compte de certains paramètres, telle la température. Ces modèles ont été principalement choisis en considérant la disponibilité des données nécessaires.

2.4.1 Méthode des k plus proches voisins

Cette méthode consiste à trouver dans l'historique des données des événements présentant une similarité avec les débits et des conditions météorologiques ressemblantes aux prévisions des prochains jours. Il est donc possible de prédire le débit à partir de ce qui a été observé dans le passé, dans des conditions similaires. Pour obtenir de bonne prévision, il faut être en possession d'un historique de données complet qui s'échelonne sur plusieurs années [Fortin *et al.*, 1997].

2.4.2 Tarissement

Il existe plusieurs formules pour calculer le tarissement d'un cours d'eau, d'une rivière ou d'une nappe artésienne. Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau développée en France permet d'effectuer une prévision des débits d'étiage [Lang et Gille, 2006]. Cette méthode s'appuie sur la Loi de Maillet et prend en considération les précipitations et le temps de ressuyage. Cette méthode a été analysée et certaines modifications ont été apportées afin de l'appliquer au bassin versant à l'étude.

Méthode de Lang

Cette méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau qui a été développée en France [Lang et Gille, 2006] s'appuie sur la loi de Maillet, tout en énumérant les critères nécessaires pour la détermination d'une séquence de tarissement. Les différentes étapes nécessaires à l'application de cette méthode sont présentées ici.

A) Sélection des séquences de tarissement

Cette méthode nécessite tout d'abord de déterminer les épisodes respectant les trois conditions suivantes :

- Les précipitations journalières sont inférieures à 1 mm
- Les débits sont décroissants
- Le débit initial de la séquence est inférieur au débit moyen historique

Les débits influencés par le ressuyage doivent ensuite être éliminés. Les premiers jours de chacune des séquences doivent être supprimés, car il s'agit du temps de ressuyage dont la valeur en jour correspond à $Tr = A^{0.2}$, avec A représentant la superficie du bassin versant en km². Pour les étapes suivantes, les séquences comprenant un minimum de trois jours consécutifs non influencé par le ressuyage sont conservées. Les séquences qui ne satisfont pas cette condition sont éliminées de la sélection.

La méthode utilisée pour déterminer le débit de départ est d'utiliser les trois derniers débits de la séquence pour trouver la pente de la droite et d'extrapoler les jours antérieurs. L'écart entre les débits de la séquence et la droite extrapolée doit être de moins de 1,5 % selon la méthode présentée par Lang et al. (2006), mais dans le cadre de ce projet, les débits ne s'éloignant pas de plus de 5 % de la droite de tendance seront conservés afin d'avoir un nombre de données suffisant à cette analyse. Les débits de la séquence s'éloignant de plus de 5 % de la droite extrapolée sont supprimés. Le jour 0 est le premier point de la séquence répondant aux exigences. La figure 2.3 suivante présente un exemple de séquence de tarissement avec la droite extrapolée.

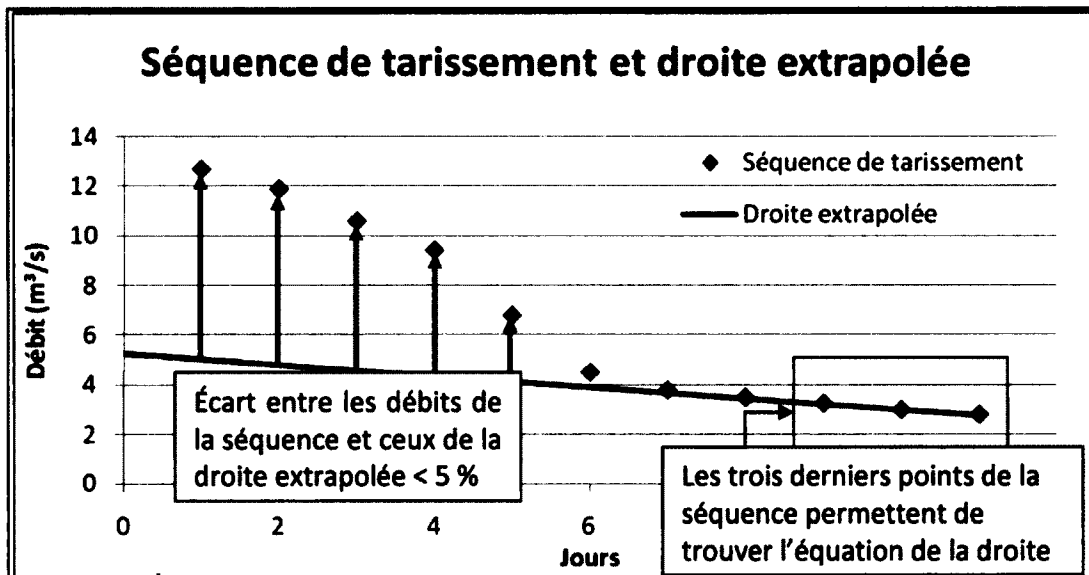


Figure 2.3 Exemple de séquence de tarissement et de la droite extrapolée

B) Détermination de la courbe maîtresse de tarissement (α maître)

Suite à la première étape, le débit de chacun des jours de la séquence est présenté en fonction du débit du jour 0 sur un graphique différent pour chacun des jours. Les graphiques contenant plusieurs points sont conservés. Sur ces graphiques, le coefficient de corrélation devrait s'approcher de 1 et la courbe de tendance doit être linéaire, tel que montré à la figure 2.4.

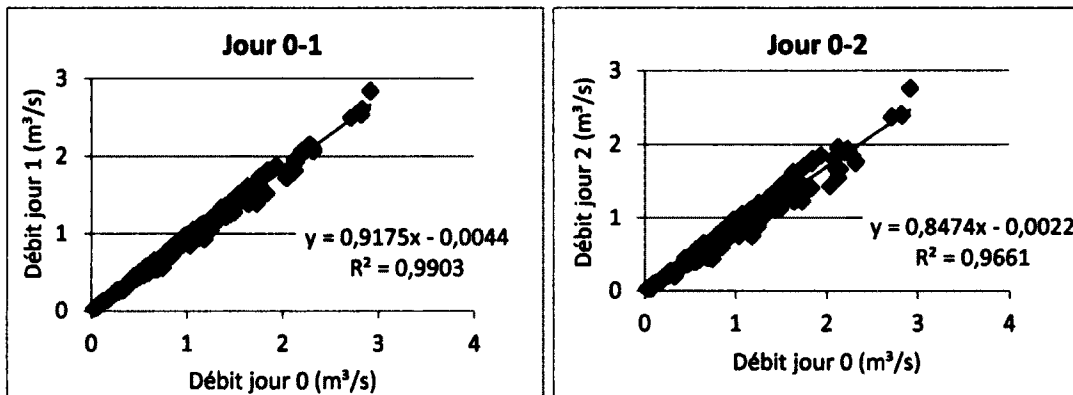


Figure 2.4 Débit du jour 1 en fonction du jour 0 et jour 2 selon le jour 0

Ensuite, un graphique est créé à partir de la valeur de la pente de la relation trouvée pour chacun des graphiques obtenus à l'étape précédente et du jour mis en relation avec le jour

0 (voir la figure 2.5 pour un exemple). La courbe de tendance est exponentielle et le α maître est donné par la valeur de l'exposant.

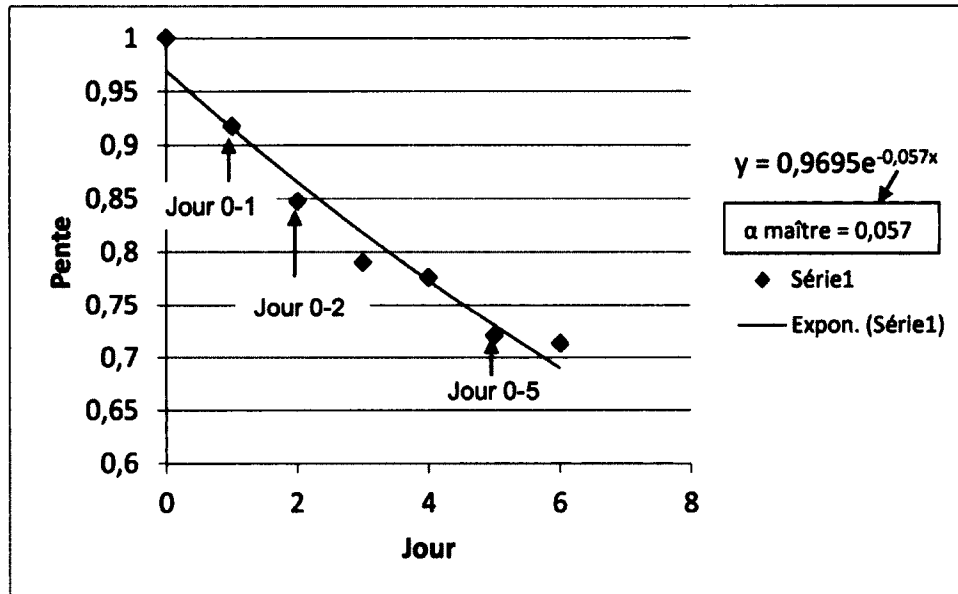


Figure 2.5 Détermination de l' α maître

C) Détermination des intervalles de confiance (α moyen, $\alpha_{0,25}$ et $\alpha_{0,75}$)

Pour chacune des séquences de tarissement respectant les critères présentés précédemment, la valeur du coefficient de tarissement (α) est évaluée à l'aide de la loi de Maillet :

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (\text{éq. 2.7})$$

- Où :
- Q : Le débit à l'instant t , en m^3/s
 - Q_0 : Le débit au début du tarissement, en m^3/s
 - t : Le temps écoulé depuis le début du tarissement, en jours
 - α : Le coefficient de tarissement

Ces différents coefficients permettent d'effectuer une analyse statistique et d'en faire ressortir la moyenne, le premier quartile et le troisième quartile. Ces trois données

correspondent aux α moyen, $\alpha_{0,25}$ et $\alpha_{0,75}$, ces deux dernières valeurs représentent l'intervalle de confiance et sont calculé à l'aide d'une distribution de Weibull.

La méthodologie proposée par Lang et al. (2006) pour déterminer le tarissement dans une rivière est utilisée dans cette étude, avec quelques variantes. La première modification à cette méthode est l'ajout d'un critère lors de la détermination des séquences de tarissement retenues. Pour mieux représenter le comportement de la rivière en période estivale, seules les séquences de tarissement ayant eu lieu entre le 1^{er} mai et le 31 octobre sont retenues. La deuxième modification est l'ajustement de l'écart entre les débits de la séquence et la droite extrapolée qui est de 5% dans cette étude.

Effet de la température

Plusieurs études présentent les mêmes conclusions par rapport à l'effet de la température sur le coefficient de tarissement d'une rivière. Le coefficient de tarissement (α) augmente avec des températures plus élevées [Cappus, 1960; Štravs et Brilly, 2007]. Cela est principalement dû à l'évaporation plus importante en présence de températures élevées.

Effet du débit initial

Le débit au début de la séquence de tarissement a aussi une influence sur la valeur du coefficient de tarissement. Plus le débit initial est élevé, plus la valeur du coefficient de tarissement est élevée [Štravs et Brilly, 2007]. Pour tenir compte du débit initial, plusieurs coefficients peuvent donc être déterminés selon le débit du point de départ. Si le débit initial est trop élevé, il faut choisir un autre point de départ pour appliquer le modèle de tarissement.

Effet de la variation du débit au cours des 24 h précédentes

En plus des deux paramètres mentionnés précédemment, le modèle de prévision des faibles débits par la méthode d'apprentissage machine M5 [Štravs et Brilly, 2007] propose de prendre en considération la variation du débit au cours des 24 heures précédant le temps où les prévisions sont effectuées. Le coefficient de tarissement est donc différent si le débit

a connu une forte diminution les 24 heures précédentes que si le débit a plutôt connu une plus faible diminution.

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT

3.1 Description du bassin versant

Le bassin versant de la rivière Yamaska est situé dans deux régions administratives : la Montérégie et l'Estrie ainsi que dans deux grandes régions physiographiques : les Appalaches et les Basses-Terres du Saint-Laurent. Ce bassin est bordé à l'ouest par le bassin versant de la rivière Richelieu et à l'est par le bassin versant de la Saint-François. La rivière Yamaska prend sa source dans le lac Brome, bien que différents tributaires (les rivières Yamaska Sud-Est, Yamaska Nord et Noire) alimentent ce cours d'eau jusqu'à son exutoire, le fleuve Saint-Laurent.

L'utilisation du territoire est divisée en deux grandes parties. Dans les basses-terres du Saint-Laurent, l'agriculture est la principale occupation du sol, grâce aux conditions climatiques clémentes et à la richesse des terres [OBV Yamaska, 2010]. En amont, dans les Appalaches, la couverture forestière est la principale occupation du sol. La figure 3.1 [OBV Yamaska, 2010] illustre bien la situation.

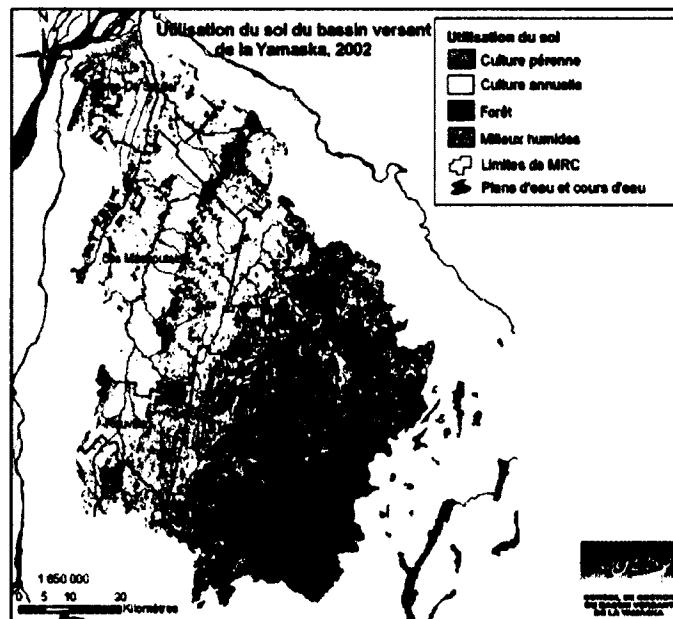


Figure 3.1 Utilisation du sol (source : OBV Yamaska)

Les principales villes dans le bassin versant sont St-Hyacinthe, Granby, Bromont, Cowansville et Farnham (figure 3.2). La section à l'étude est le sous-bassin de St-Hyacinthe. La partie en aval de St-Hyacinthe n'est pas étudiée dans le cadre de ce projet car il n'y a pas de station de filtration utilisant les eaux de surface. Tel que présenté à la figure 3.1 précédente, l'utilisation du sol est très différente pour ces municipalités. À St-Hyacinthe, les grandes cultures sont prédominantes tandis qu'à Cowansville et Bromont, l'occupation du sol est majoritairement de type boisé mixte.

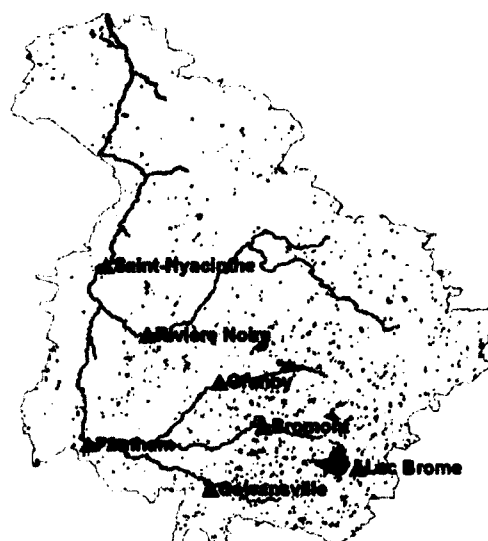


Figure 3.2 Localisation du bassin versant

Les stations hydrométriques qui sont présentes tout au long de la rivière et qui ont été utilisées sont répertoriées au tableau 3.1. Des réserves d'eau, de moindre importance, sont aussi présentes en amont des prises d'eau de St-Hyacinthe et Farnham. Des prises d'eau et des rejets provenant des stations d'épuration et d'autres sources de pollution sont aussi réparti tout au long de la rivière. La figure 3.3 présente les sources ponctuelles de pollution sur le bassin de la rivière Yamaska [Ministère de l'environnement, 1999].

Tableau 3.1 Caractéristiques des stations hydrométriques à l'étude

Station	Localisation	Années étudiées	Superficie (km ²)
030301	Lac Brome	1935 - 1960	188
030302	Farnham	1966 - 2010	1230
030304	Rivière Noire	1966 - 2010	1490
030309	Granby	1975 - 2010	139
030314	Cowansville	1979 - 2010	210
030340	Aval de Granby	1984 - 2010	248
030341	St-Hyacinthe	1984 - 1993	3310
030345	St-Hyacinthe	2001 - 2010	3330
030351	Lac Brome	2006 - 2010	190

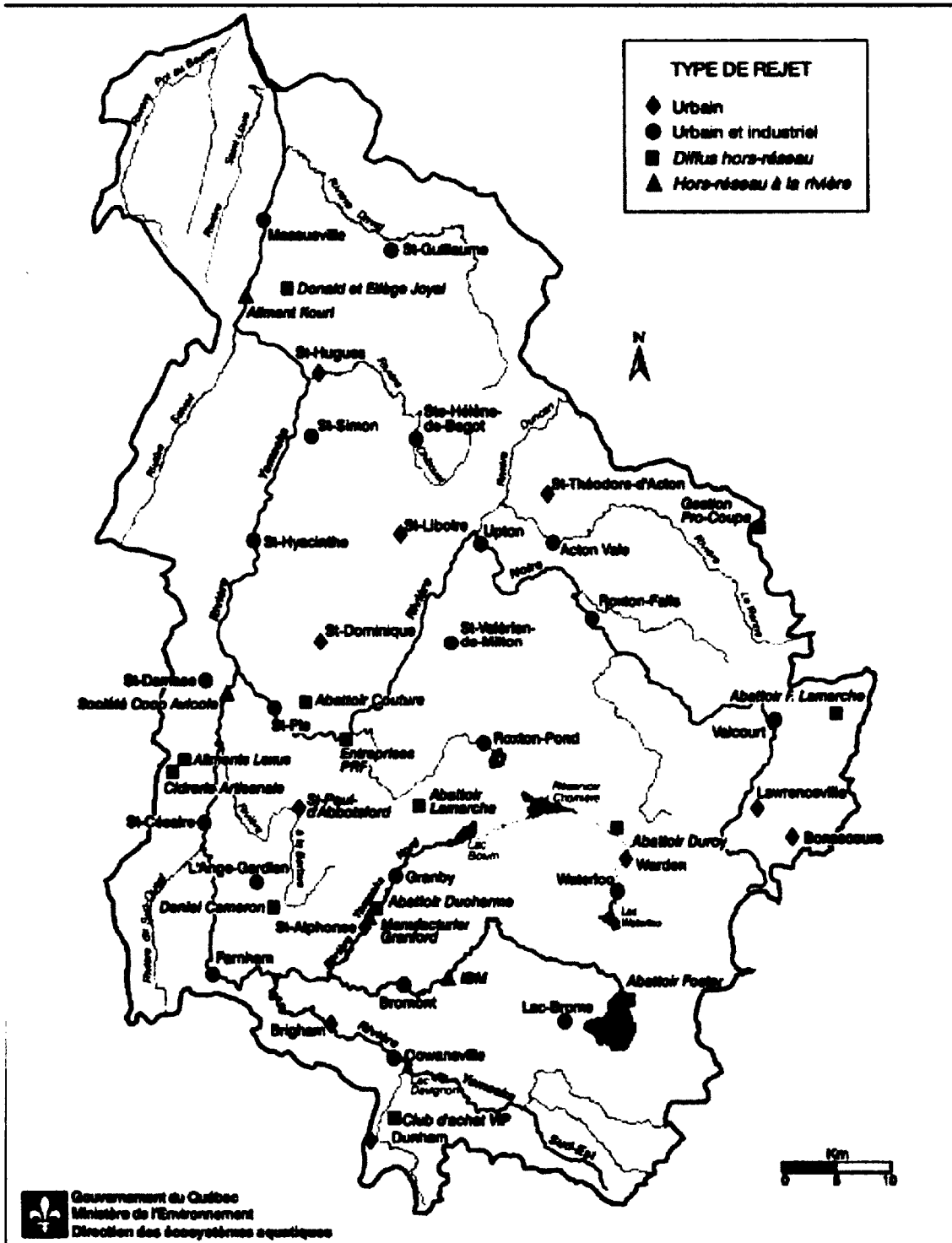


Figure 3.3 Emplacement des principales sources ponctuelles de pollution dans le bassin versant de la rivière Yamaska (source : MDDEP)

Certaines villes bénéficient d'un barrage retenant une grande réserve d'eau tel que le Lac Brome, situé en amont de Bromont sur la branche Principale de la rivière et le lac Boivin, le réservoir Choinière et le réservoir Lemieux situé près de Granby sur la branche Nord de la rivière Yamaska. Granby peut aussi profiter d'une source complémentaire d'eau dans le Lac Coupland qui est situé à proximité. Bromont et Granby bénéficient donc de la gestion de réserves d'eau situées en amont de leur prise d'eau. La municipalité de Cowansville possède aussi un barrage et le réservoir Davignon où se situe leur prise d'eau sur la branche sud-est, mais il s'agit d'une très petite réserve et aucune gestion n'est possible à ce barrage-seuil. Farnham bénéficie de l'apport des trois différentes branches de la rivière, ce qui contribue à apporter un débit plus important. Finalement, St-Hyacinthe profite de la rivière Noire qui provient d'une section plus boisée et peu cultivée du bassin. Les caractéristiques et la localisation des différentes réserves d'eau sont représentées au tableau 3.2 et sur la figure 3.4 [Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2002]. L'annexe E présente la production d'eau potable de ces différentes municipalités.

Tableau 3.2 Caractéristiques des réserves d'eau

Lac / Réservoir	Localisation	Rivière	Superficie (km ²)
Lac Brome	Lac Brome	Yamaska principale	14.53
Bromont	Bromont	Yamaska principale	0.41
Lac Davignon	Cowansville	Yamaska Sud-est	1.20
Lac Boivin	Granby	Yamaska Nord	1.61
Lac Coupland	Granby	Prise d'eau potable complémentaire à Granby	0,12
Réservoir Lemieux	Granby	Yamaska Nord	Dans le lac Boivin
Réservoir Choinière	Roxton Pond	Yamaska Nord	4.70
Lac Waterloo	Waterloo	Yamaska Nord	1.50

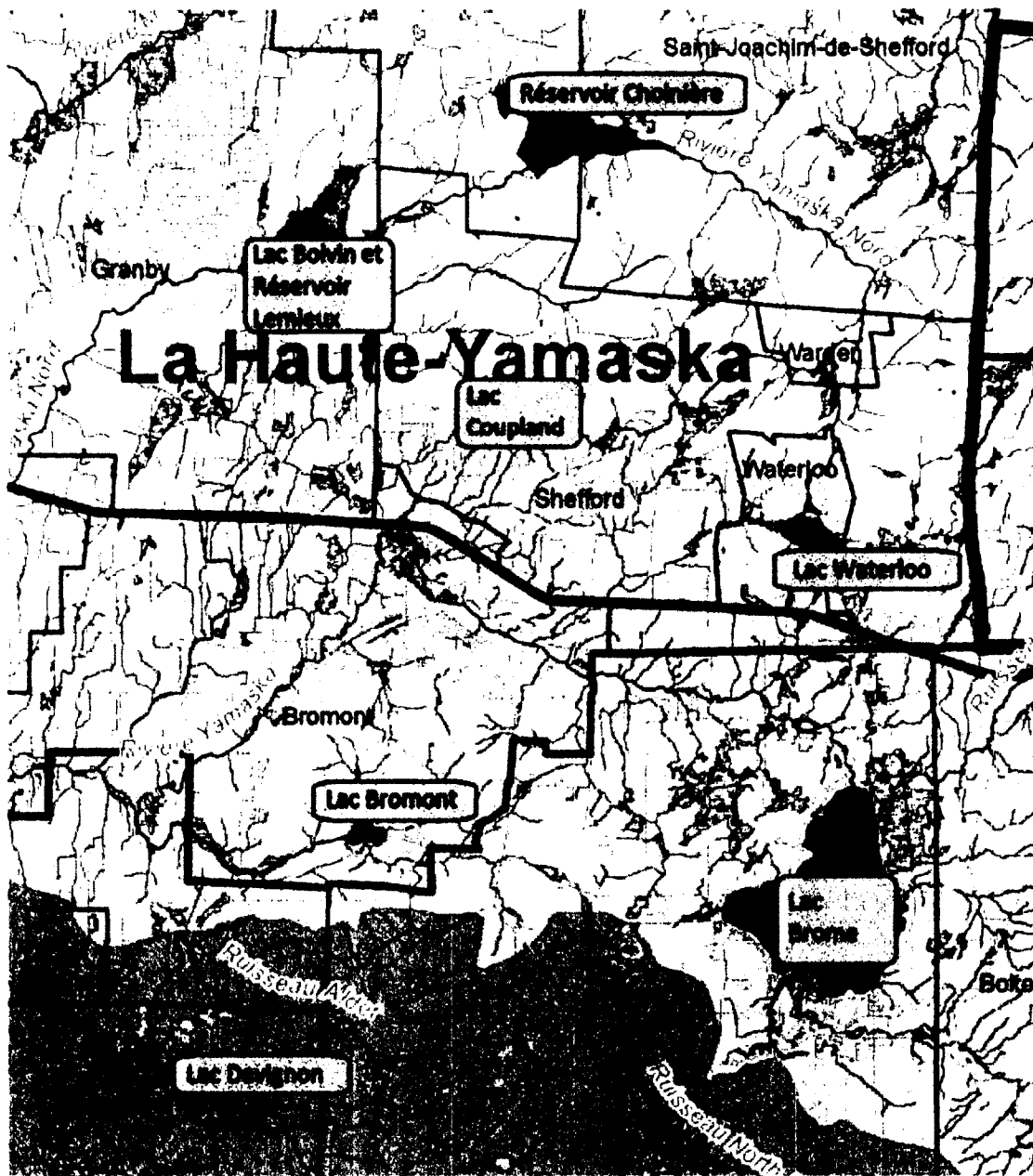


Figure 3.4 Localisation des réserves d'eau

3.2 Hydraulicité générale du bassin

La répartition des précipitations sur le bassin versant est assez constante et se situe autour de 1100 mm (figure 3.5) qui sont étalés sur 125 à 150 jours de précipitation. Les fortes précipitations se produisent principalement en période estivale [OBV Yamaska, 2010]. Selon les stations météorologiques, la partie amont du bassin, plus en altitude et plutôt boisée, reçoit un peu plus de précipitations que la partie aval du bassin où l'utilisation du sol est principalement les cultures. Les débits moyens annuels (QMA) aux différentes stations de mesures corroborent ces valeurs si on compare les débits spécifiques. Le débit spécifique est obtenu en divisant le débit moyen par la superficie du sous-bassin. Ce débit est plus élevé en amont qu'en aval, tout comme les précipitations, mais ce débit se situe autour de 20 l/s/km² (figure 3.6), comme pour les rivières du sud du Québec.

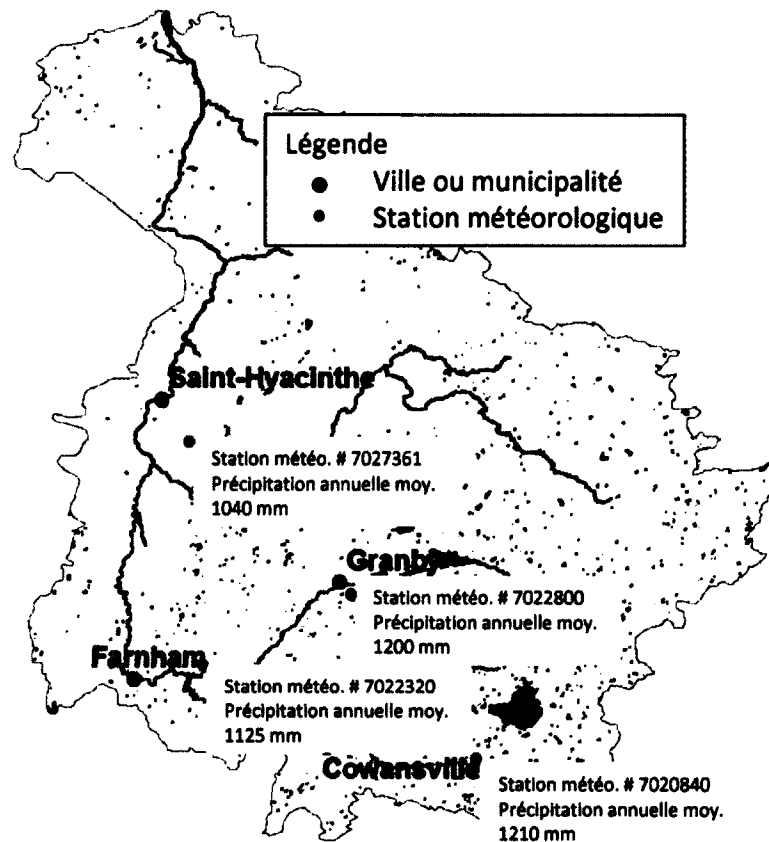


Figure 3.5 La pluviométrie du bassin versant

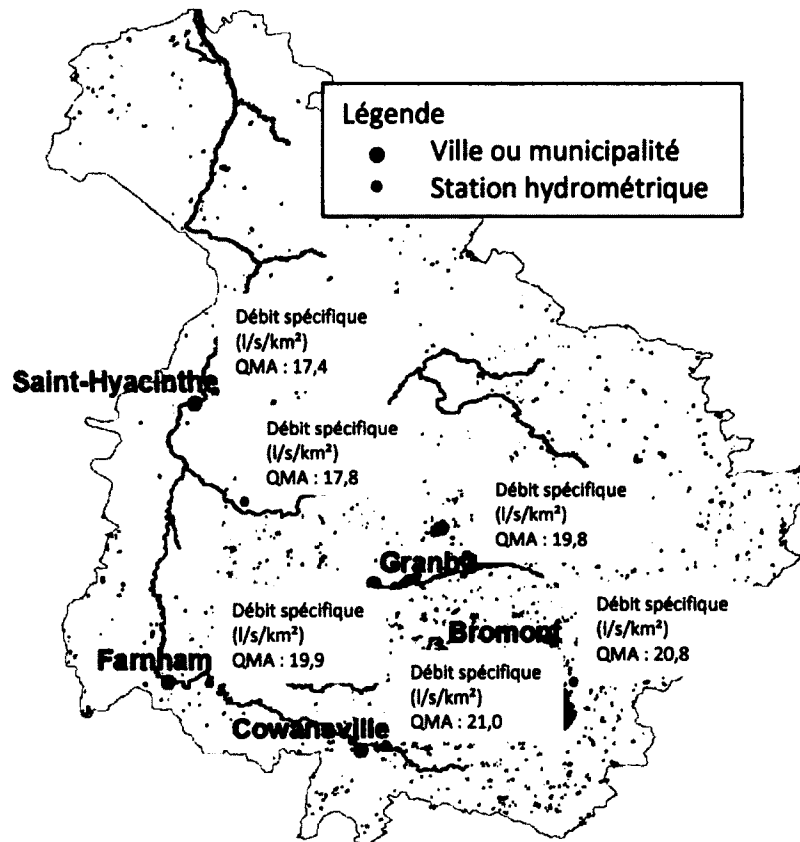


Figure 3.6 Les débits spécifiques des différentes stations

À l'aide de ces données, il est aussi possible de calculer qu'environ 55% des précipitations annuelles se retrouvent sous forme de ruissellement et sont mesurées en débit dans la rivière. Il est donc réaliste d'en déduire que l'infiltration, l'évaporation et l'utilisation par la végétation représentent environ 45 % des précipitations selon le bilan hydrique du bassin versant [Castany, 1965].

3.3 Vulnérabilité

Pour évaluer la quantité d'eau qui peut être prélevée d'un cours d'eau, différentes lois mises en place par le gouvernement du Québec imposent des limites de prélèvements. L'article 17 du *Règlement sur les habitats fauniques* et de la *Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune* se lit comme suit :

« 17. Dans un habitat du poisson, une personne ne peut effectuer du pompage d'eau que conformément à l'une ou l'autre des conditions suivantes :

1° dans le cas d'un cours d'eau, le prélèvement ne peut excéder 15 % du débit du cours d'eau à l'endroit où le prélèvement est effectué;

2° dans le cas d'une plaine d'inondations, le prélèvement ne peut excéder 45 000 litres par jour;

3° dans le cas d'un lac, le prélèvement ne peut abaisser le niveau de plus de 15 cm; un avis écrit doit être transmis par courrier recommandé au ministre des Ressources naturelles et de la Faune au moins 15 jours avant la date prévue pour le début du pompage d'eau; cet avis doit indiquer le nom et la localisation du lac où le pompage d'eau est projeté, sa durée prévue ainsi que la date du début de cette activité.

D. 905-93, a. 17. » [Québec, 2012]

Dans cette loi, le débit du cours d'eau du point 17-1° n'est pas spécifié (en période d'étiage, période de crue, débit moyen annuel?). Le Guide de conception des installations de production d'eau potable du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs apporte cependant une précision par rapport à ce débit, qui est un débit d'étiage, pour les prises d'eau :

« Le débit maximum qu'il est permis de prélever est établi à 15 % du Q2-7 originel, débit duquel il faut soustraire les prélèvements en amont. La valeur ainsi obtenue est, par définition, la capacité de la source d'approvisionnement au point de prélèvement. Cette base

de calcul est issue de l'article 17 du Règlement sur les habitats fauniques (Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune) qui stipule que "le prélèvement ne peut excéder 15 % du débit du cours d'eau à l'endroit où le prélèvement est effectué». Il est possible d'excéder le 15 % du Q2-7 originel en effectuant la démonstration prévue au cinquième alinéa. Par contre, si cette démonstration s'avère négative, le 15 % du Q2-7 originel demeure la valeur de référence.» [Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2006]

D'autres sources énoncent des valeurs différentes pour les prélèvements, dont la « fiche technique no 14 : Prise d'eau » qui stipule que « *La quantité d'eau prélevée dans un cours d'eau ne doit pas dépasser 20 % du débit d'étiage de récurrence 2 ans calculé sur 7 jours consécutifs (Q2-7), afin de préserver la vie dans le cours d'eau ainsi que les autres usages de l'eau susceptibles d'être affectés par le prélèvement d'une quantité d'eau* » [Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 1999]. Par contre, ce règlement ne s'applique pas aux prises d'eau aux fins d'eau potable, mais plutôt pour les différents autres types de prises d'eau.

En tenant compte de ces différents lois et règlements, pour les prises d'eau à des fins municipales, la quantité maximale d'eau qui peut être prélevée est donc représentée par 15 % du Q2-7 (ou 7Q2 avec la nomenclature utilisée dans ce projet). La méthodologie pour déterminer l'indice 7Q2 ainsi que les différents autres indices est définie dans les sections suivantes.

Des études antérieures ont été faites pour évaluer la vulnérabilité des prises d'eau de différentes municipalités au Québec par rapport à ce critère [Bérubé, 2007 et Nantel, 2006]. Certaines villes sur le bassin versant de la rivière Yamaska ont fait partie de ces études qui s'appuient sur deux différents indices. Le premier indice correspond au rapport du 7Q2 sur le volume quotidien moyen prélevé (vulnérabilité selon la demande en eau) et le second indice correspond au rapport entre 15 % du 7Q2 et le volume quotidien moyen prélevé (vulnérabilité selon les directives du gouvernement pour la protection de l'habitat

aquatique) [Nantel, 2006]. Un site est considéré vulnérable lorsque l'indice est plus petit que 1.

Bien que les études précédentes n'aient pas évalué la vulnérabilité de toutes les municipalités du bassin versant à l'étude, les résultats de ces études antérieures montrent que certaines municipalités pourraient devenir vulnérables dans le cas de changements climatiques.

Une analyse de ces indices de vulnérabilité a été effectuée pour les principales municipalités du bassin versant qui possèdent une prise d'eau et les résultats sont présentés au tableau 3.3.

- Vulnérabilité selon la demande en eau = 7Q2 / Prélèvement moyen annuel
- Vulnérabilité selon l'habitat aquatique = 15% du 7Q2 / Prélèvement moyen annuel

Pour déterminer la vulnérabilité, les prélèvements effectués à la prise d'eau, lorsque celle-ci est située en amont de la station de mesure hydrométrique, ont été ajoutés aux débits observés pour obtenir l'indice 7Q2 en débit naturel. Cette modification s'applique aux différentes villes où la station de mesure hydrométrique est située entre la prise d'eau et le rejet de la station d'épuration. Il n'est toutefois pas possible de déterminer la vulnérabilité de cette façon à Bromont et Granby puisqu'il y a une gestion des réservoirs et lacs en amont.

Tableau 3.3 Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel

Ville	Station	7Q2 naturel (l/s)	15 % du 7Q2 (l/s)	Prélèvement moyen annuel (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Cowansville	030314	288.0	43.2	94.2	3.06	0.46
Farnham	030302	2970.0	445.5	79.0	37.59	5.64
St-Hyacinthe	030345	4890.0	733.5	366.0	13.36	2.00

Il ressort de ce tableau que la municipalité de Cowansville est vulnérable pour la protection de l'habitat aquatique, mais pas pour la demande en eau.

Pour obtenir une évaluation de la vulnérabilité de Bromont et Granby, les débits garantis selon les conventions ont été utilisés. Ces conventions déterminent les règles de gestion des barrages et ainsi définissent le débit minimal qui doit être relâché par le barrage. Une fraction de 15% de ce débit devrait donc être la valeur du prélèvement maximal [Québec, 2012].

La convention en vigueur entre le Lac Brome et Bromont fait en sorte que la Ville de Lac Brome doit assurer en tout temps un débit minimum à la sortie du barrage équivalant à 0,88 m³/s (880 l/s) avec possibilité de réduire ce débit à 0,60 m³/s dans certaines circonstances et à certains moments de l'année et une possibilité d'augmenter ce débit à 1 m³/s [Renaissance Lac Brome, 2011]. Il est considéré dans cette analyse de la vulnérabilité que le débit à la sortie du barrage demeure supérieur ou égal à 0,88 m³/s. Il s'en suit que le débit à la prise d'eau de Bromont ne descend pas sous la valeur de 0,88 m³/s puisqu'aucun prélèvement n'est effectué entre la station de mesure à Lac Brome et la prise d'eau de Bromont en période estivale.

De même pour Granby, le débit minimum au lac Boivin est de 1,4m³/s (1400 l/s), ce qui est plus élevé que la valeur du 7Q2 qui a été calculée à l'aide du débit naturel [Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2004].

En utilisant les valeurs des débits qui sont garantis presque en tout temps (tableau 3.4), on observe que Bromont est loin de la limite de la vulnérabilité, mais que Granby est vulnérable pour l'habitat aquatique. La gestion des différents lacs Boivin et Coupland et des réservoirs Lemieux et Choinière permet toutefois d'assurer un débit minimum suffisant à la conservation de l'habitat aquatique à Granby.

Tableau 3.4 Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel (Bromont et Granby)

Ville	Débit garanti (l/s)	15 % du débit (l/s)	Prélèvement moyen annuel (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Bromont	880.0	132.0	65.7	13.39	2.01
Granby	1400.0	210.0	377.9	3.70	0.56

La vulnérabilité a aussi été analysée en considérant la pointe journalière au lieu du prélèvement moyen annuel, tout en conservant les valeurs des débits garantis à Bromont et Granby. Encore une fois, la vulnérabilité est présente à Cowansville et Granby. Les tableaux 3.5 et 3.6 présentent les résultats obtenus.

Tableau 3.5 Vulnérabilité selon la pointe journalière

Ville	Station	7Q2 (l/s)	15 % du 7Q2 (l/s)	Pointe journalière (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Cowansville	030314	288.0	43.2	121.4	2.37	0.36
Farnham	030302	2970.0	445.5	105.8	28.07	4.21
St-Hyacinthe	030345	489.00	733.5	545.0	8.97	1.35

Tableau 3.6 Vulnérabilité selon la pointe journalière (Bromont et Granby)

Ville	Débit garanti (l/s)	15 % du débit (l/s)	Pointe journalière (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Bromont	880.0	132.0	121.4	7.25	1.09
Granby	1400.0	210.0	508.6	2.75	0.41

La figure 3.7 représente graphiquement la vulnérabilité selon la protection de l'habitat aquatique pour le prélèvement moyen annuel et la pointe journalière.

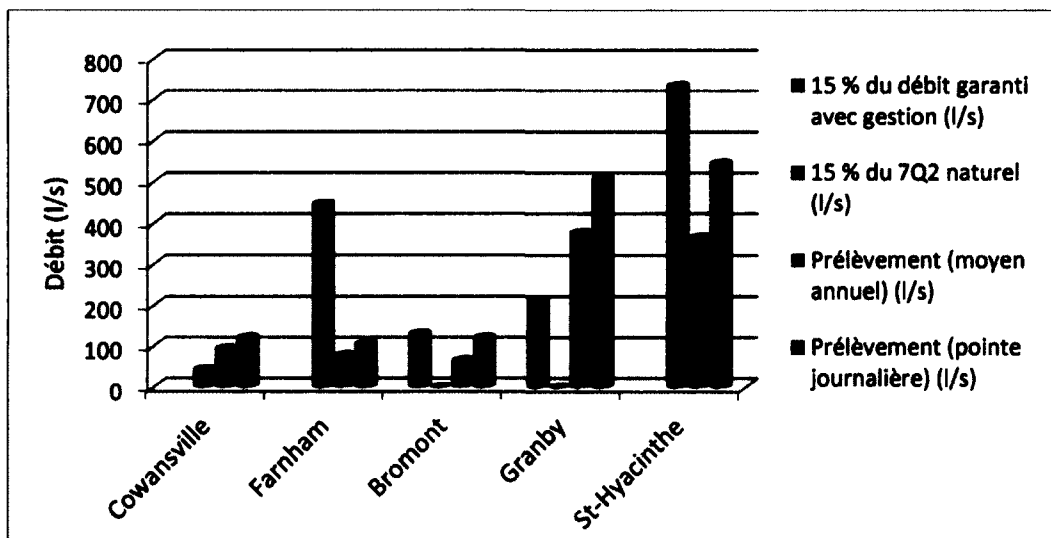


Figure 3.7 Vulnérabilité pour la protection de l'habitat aquatique

Bien que la situation à Granby semble critique, la gestion des réservoirs et lacs en amont de la ville permet une gestion de la ressource en eau assez efficace pour permettre le maintien d'un débit suffisant en période estivale, et ce, même en période de sécheresse. Le réservoir Choinière retient un volume d'eau équivalent à plus de deux fois la consommation totale annuelle de la ville de Granby [Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2004]. De plus, la réserve Lemieux, dans le lac Boivin, assure une autonomie de plusieurs jours à la Ville de Granby.

L'état de la situation à Cowansville est plus critique puisqu'il n'y a pas de grande réserve d'eau pour en permettre la gestion pendant la période estivale. Pour cette raison, c'est cette municipalité qui servira d'exemple dans ce rapport pour les étapes menant à l'élaboration du système d'alerte. La même démarche a aussi été effectuée pour chacune des autres municipalités et les résultats sont aussi présentés, que l'on trouvera dans les différentes annexes.

3.4 Choix de la meilleure loi de distribution

Avant de déterminer les valeurs des différents indices d'étiage, ou d'effectuer toute analyse statistique, les historiques des débits des différentes stations présentes sur le bassin versant de la rivière Yamaska ont subi des tests d'homogénéité, d'indépendance et de stationnarité à l'aide du logiciel Hyfran.

Lors de chacun de ces tests, il est possible d'obtenir 2 résultats différents : l'acceptation ou le rejet de l'hypothèse. Pour le test d'homogénéité, les moyennes des deux sous-échantillons peuvent être égales, donc les sous-échantillons sont homogènes. L'autre conclusion possible est que les deux sous-échantillons ne sont pas homogènes. Le niveau de signification peut toutefois être de 1% ou 5%, dépendant de la certitude du résultat.

Pour le test d'indépendance, les observations peuvent être indépendantes au niveau de signification de 5%, indépendantes au niveau de signification de 1%, ou encore dépendantes (autocorrélation d'ordre 1). De même, pour le test de stationnarité, il est possible d'obtenir qu'il n'y ait aucune tendance dans les observations au niveau de signification de 5% ou de 1%, ou, au contraire, qu'une tendance soit présente dans les observations.

Parmi les neuf stations à l'étude, cinq stations répondent aux trois exigences mentionnées précédemment au niveau de signification de 5% pour l'analyse du 7Q2 et 7Q10, tel que présenté aux tableaux 3.7 et 3.8. Deux autres stations présentent plutôt un niveau de signification de 1% à un ou plusieurs des tests et les deux stations restantes ne respectent pas certains des critères des tests effectués. Pour l'analyse du 30Q5, cinq stations répondent aux trois exigences mentionnées précédemment au niveau de signification de 5%, trois présentent plutôt un niveau de signification de 1% et une seule station ne respecte pas certains critères.

Les stations hydrométriques ne répondant pas aux critères des différents tests ont tout de même été analysées, tout en étant conscient que certaines valeurs ressortant des analyses peuvent être fausses et sont à utiliser avec prudence.

Lorsque l'ajustement des échantillons est fait avec les différentes lois de distribution (Gumbel, GEV, LP3 et Weibull), le critère d'information bayésien (BIC) permet de déterminer la fonction de distribution qui s'ajuste le mieux aux données étudiées. Dans les tableaux 3.7 et 3.8 suivants, on observe que la distribution de Weibull s'applique le mieux à 6 échantillons sur le total des 15 échantillons, la distribution de Gumbel à 5 échantillons, la distribution LP3 à 3 échantillons et finalement, la distribution GEV à 1 seul échantillon selon la valeur du BIC. On peut donc conclure que pour les périodes d'étiage sur le bassin versant de la rivière Yamaska, les lois de distribution de Weibull et Gumbel sont les plus appropriées. Chacune des stations sera toutefois traitée avec la loi de distribution qui s'applique le mieux à sa situation.

Tableau 3.7 Lois de distribution pour les indices 7Q2 et 7Q10

Indices 7Q2 et 7Q10					
Station	Lieu	Indépendance	Stationnarité	Homogénéité	Distribution
030301	Lac Brome	Dépendant	OK 5%	OK 5%	Weibull
030302	Farnham	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Gumbel
030304	Rivière Noire	OK 5%	OK 5%	OK 5%	LP3
030309	Granby	OK 5%	Tendance	Non homogène	GEV
030314	Cowansville	OK 5%	OK 5%	OK 5%	LP3
030340	Granby	<u>Ok 1%</u>	<u>Ok 1%</u>	OK 5%	Weibull
030341	St-Hyacinthe	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Weibull
030345	St-Hyacinthe	OK 5%	OK 5%	<u>Ok 1%</u>	Weibull
030351	Lac Brome	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Gumbel

Tableau 3.8 Lois de distribution pour l'indice 30Q5

Indice 30Q5					
Station	Lieu	Indépendance	Stationnarité	Homogénéité	Distribution
030301	Lac Brome	OK 5%	<u>Ok 1%</u>	OK 5%	Weibull
030302	Farnham	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Gumbel
030304	Rivière Noire	OK 5%	OK 5%	OK 5%	LP3
030309	Granby	OK 5%	Tendance	Non homogène	GEV
030314	Cowansville	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Weibull
030340	Granby	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Gumbel
030341	St-Hyacinthe	OK 5%	OK 5%	OK 5%	Weibull
030345	St-Hyacinthe	OK 5%	OK 5%	<u>Ok 1%</u>	Gumbel
030351	Lac Brome	OK 5%	OK 5%	<u>Ok 1%</u>	GEV

La station 030309 à Granby ne répond pas aux critères de stationnarité et d'homogénéité et la station 030301 à Lac Brome ne répond pas au critère d'indépendance. Une explication à cette situation est le contrôle de la ressource en eau découlant du barrage en amont de la station de mesure des débits, ou à la localisation de cette station de mesure. Ce contrôle empêche l'écoulement en régime naturel et les débits mesurés sont influencés par ce contrôle.

3.5 Adaptation pour Bromont et Granby

Pour obtenir un système d'alerte complet et fonctionnel, les cinq principales villes doivent être représentées (St-Hyacinthe, Granby, Bromont, Cowansville et Farnham). Par contre, l'information disponible et l'emplacement des stations de mesures hydrométriques sur le bassin versant de la rivière Yamaska ne permettent pas d'obtenir directement toutes les informations nécessaires à l'élaboration d'un système d'alerte. Certains ajustements sont donc nécessaires pour les villes de Bromont et Granby.

À Bromont, aucune station hydrométrique n'est présente à la prise d'eau municipale. Aussi, l'historique des débits mesurés à la sortie du lac est insuffisant ou trop ancien pour effectuer les différentes analyses nécessaires à l'élaboration du prototype de système d'alerte. De plus, ces débits sont fortement influencés par la gestion du Lac Brome, principalement pour les années récentes où des changements ont été apportés à la gestion du Lac Brome.

À Granby, les débits mesurés par la station hydrométrique à la sortie du réservoir Choinière sont influencés par la gestion de ce même réservoir. Ces débits ne répondent pas aux critères de stationnarité et d'homogénéité et ne peuvent donc pas être utilisés pour effectuer les différentes analyses statistiques nécessaires à la détermination des niveaux d'alerte. De plus, la station hydrométrique présente n'est pas située au même endroit que la prise d'eau municipale.

Pour déterminer les niveaux d'alerte en débit naturel à Bromont et Granby, les débits à Cowansville ont donc été utilisés. Un premier ajustement des débits mesurés par la station 030314 est fait pour prendre en compte le prélèvement d'eau brute qui est effectué en amont de cette station de mesure.

Un deuxième ajustement de ces débits est ensuite effectué pour prendre en compte la superficie des bassins versants. Il est ainsi possible de transposer des quantités d'eau écoulée (débits) par unité de surface du bassin jaugé (station 030314) au bassin non jaugé (Bromont ou Granby) à condition de limiter les transpositions à l'intérieur d'un rapport

d'aire variant entre 0,5 et 2,0 [Besré, 2010]. L'ajustement des débits est calculé à l'aide de l'équation 3.1 suivante :

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{éq. 3.1})$$

Où A_2 : aire du bassin versant non jaugé et A_1 : aire du bassin versant jaugé.

Cette approximation des débits naturels à Bromont et Granby s'appuie sur les similitudes qui existent entre les différents sous-bassins, telles l'occupation du sol, la géographie et la pluviométrie. À l'aide de ces débits, il devient possible de calculer les différents indices d'étiage pour un régime « naturel » à Bromont et Granby, c'est-à-dire sans la gestion des lacs et réservoirs.

3.6 Détermination des indices d'étiage servant de débits seuils

3.6.1 Calcul des indices aux différentes stations

Les différents indices d'étiage présentés dans la section « État de l'art » ont été calculés pour chacune des stations hydrométriques pertinentes sur le bassin versant à l'étude. Les principaux indices et leur valeur pour chacune des stations sont présentés dans le tableau 3.9. Pour certaines stations, un prélèvement est effectué à la prise d'eau qui est située en amont de la station de mesure. C'est le cas pour les stations 030302, 030314, 0303041 et 030345. Il faut donc rester conscient que le débit mesuré est valable seulement à l'endroit où il est mesuré. Les indices aux prises d'eau de Bromont et Granby ont été déterminés pour un débit naturel à l'aide de la station de mesure à Cowansville, tel que présenté à la section précédente.

Ces différents indices ont été analysés pour déterminer ceux qui devraient s'appliquer à un système d'alerte aux étiages. On peut constater qu'avec la méthode écohydrologique [Belzile *et al.*, 1997], la valeur du débit correspondant à la médiane de la période du 1^{er} avril au 15 juillet est plus élevée que le débit correspondant à la médiane annuelle. Cela est rendu possible, car la période du 1^{er} avril au 15 juillet comprend les débits associés à la fonte des neiges. Principalement pour cette raison, la méthode écohydrologique n'a pas été retenue pour les indices correspondants aux différents niveaux d'alerte.

Afin de mieux visualiser la répartition de ces différents indices, ceux qui ont été retenus dans le cadre de cette étude sont représentés graphiquement. La figure 3.8 présente la répartition des indices pour la station 030314 à Cowansville. La représentation graphique des principaux indices d'étiage pour les autres stations hydrométriques est présentée à l'annexe A.

Tableau 3.9 Les indices d'étiage (m³/s)

	Farnham (030302)	Rivière Noire (030304)	Cowansville (030314)	St-Hyacinthe (030341 et 030345)	Bromont	Granby
Tennant						
10%	2.44	2.65	0.43	5.74	0.73	0.44
20%	4.88	5.30	0.86	11.48	1.46	0.88
30%	7.32	7.95	1.30	17.22	2.20	1.33
40%	9.76	10.60	1.73	22.96	2.93	1.77
50%	12.21	13.25	2.16	28.70	3.66	2.21
60%	14.65	15.90	2.59	34.44	4.39	2.65
New England Flow Method						
Q50 août	5.54	4.03	0.65	10.30	1.25	0.75
Q50 sept.	5.84	4.10	0.67	10.34	1.26	0.76
Méthode 0.25QMA						
0.25 QMA	6.10	6.63	1.08	14.35	1.83	1.10
Fréquence de dépassement						
Q ₅₀	12.40	10.70	1.90	27.80	3.31	2.00
Q ₀₅	3.15	1.58	0.26	4.69	0.59	0.35
Q ₉₀	4.10	2.42	0.41	7.27	0.85	0.51
Indices statistiques de bas débits						
7Q2	2.90	1.34	0.18	4.42	0.49	0.29
7Q10	1.96	0.69	0.05	1.66	0.23	0.15
7Q20	1.75	0.59	0.03	1.14	0.17	0.11
30Q5	3.01	1.44	0.20	4.15	0.49	0.30
Méthode éco-hydrologique						
0.50 QMA	12.21	13.25	2.16	28.70	3.66	2.21
0.50 QMP	15.41	16.79	2.77	34.77	4.67	2.85
Q50 août	5.54	4.03	0.65	10.30	1.25	0.75

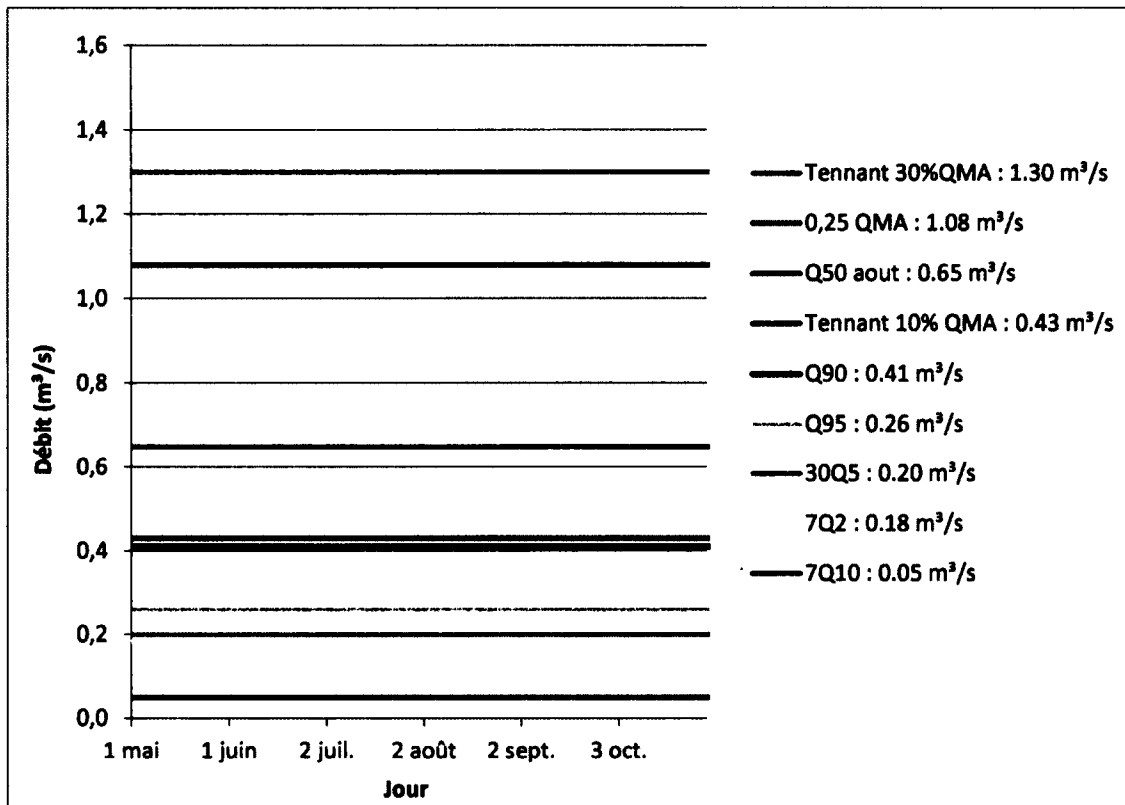


Figure 3.8 Les indices d'étiage à la station 030314

3.6.2 Niveaux d'alerte proposés

Étant donné qu'il est très difficile de définir scientifiquement et avec certitude un débit minimum nécessaire à la vie aquatique, il est nécessaire de fixer collectivement ce niveau, à la lumière d'arguments scientifiques [EPIDOR, 2011]. Il est proposé de regrouper certains indices dont les valeurs sont très proches pour en arriver à un ensemble de niveaux d'alerte à chaque station. L'ordre des indices les uns par rapport aux autres peut toutefois différer légèrement d'une station à l'autre. Cela s'explique en partie parce que certaines sections de la rivière sont régularisées par des barrages, ce qui crée des différences entre les degrés de sévérité des divers indices. Par exemple, dans le cas de St-Hyacinthe, l'ordre diffère légèrement car certaines branches de la rivière telles que celles provenant de Granby et Bromont sont régularisées par des barrages. L'ensemble proposé, avec les différents indices associés, est défini comme suit :

- **Vigilance** : débit correspondant à 0,25QMA
- **Débit objectif d'étiage (DOE)** : débit correspondant à Q50 août
- **Alerte** : débit correspondant approximativement à Tennant 10% et Q₉₀
- **Alerte renforcée** : débit correspondant approximativement à Q₉₅, 30Q5 et 7Q2
- **Crise** : débit correspondant à 7Q10

Pour la station 030314, située à Cowansville, les niveaux d'alerte correspondants sont présentés à la figure 3.9. Ces différents niveaux d'alerte ont aussi été déterminés pour les autres municipalités du bassin versant de la rivière Yamaska. Encore une fois, il est important de mentionner qu'un prélèvement est effectué dans la rivière, en amont de la station de mesure de Cowansville.

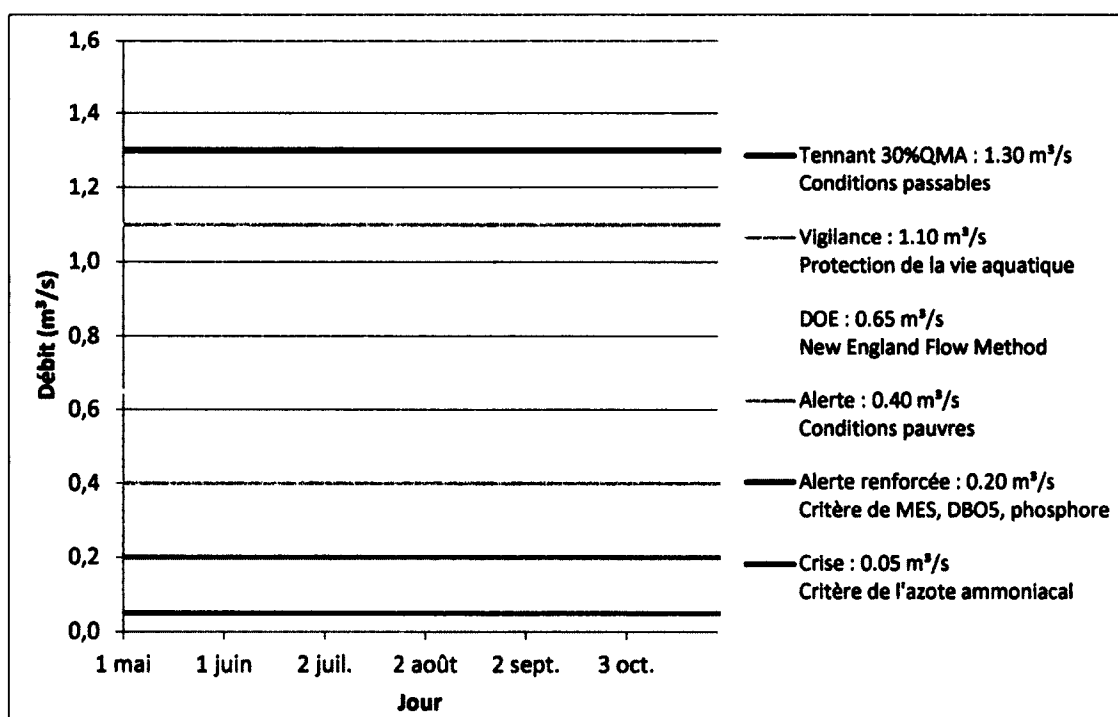


Figure 3.9 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314

Les niveaux d'alerte proposés pour chacune des différentes municipalités du bassin versant dans le cadre de cette étude sont présentés à l'annexe B.

3.6.3 Viabilité des niveaux d'alerte proposés

Une façon de vérifier la viabilité politico-économique de l'ensemble des niveaux d'alerte proposés est de l'appliquer à la série de données disponibles (1979 – 2010 dans le cas de la station de Cowansville). À titre d'exemple, pour l'année 2001 à Cowansville, reconnue comme une année ayant connu un étiage historique, le débit est descendu plusieurs jours sous le niveau de crise proposé. La figure 3.10 illustre la situation rencontrée en 2001.

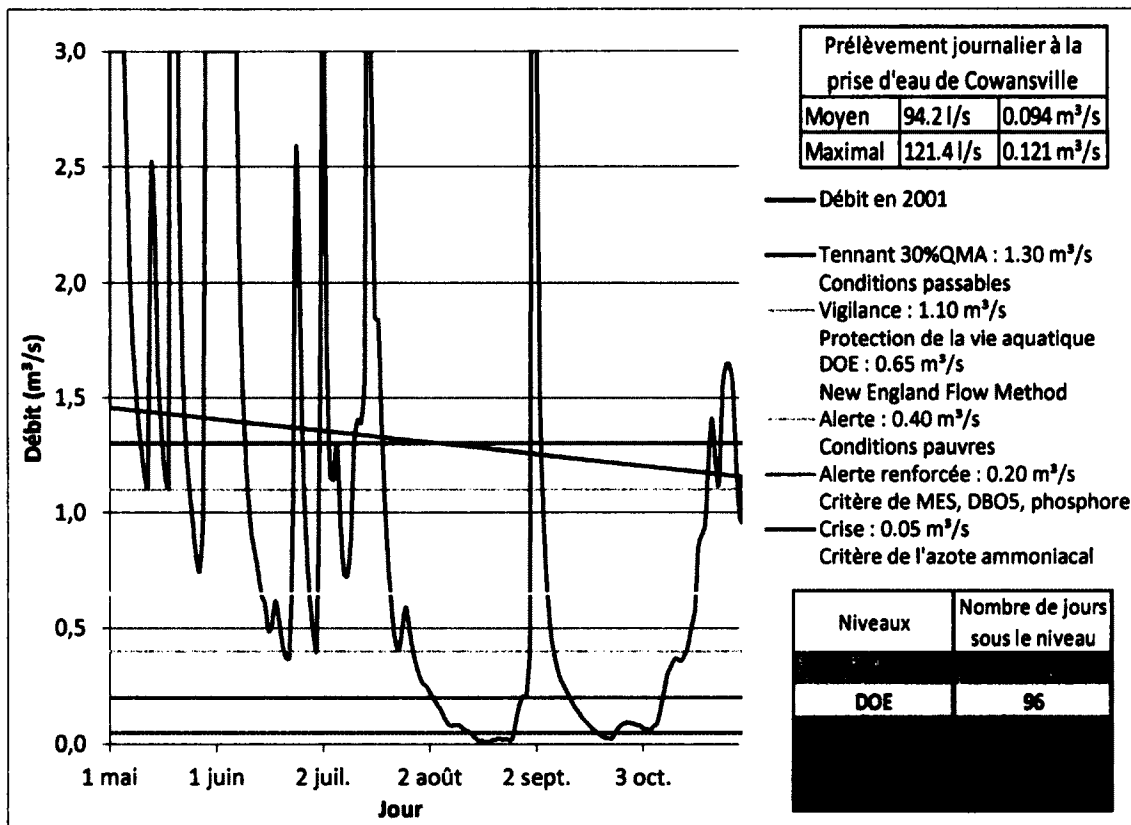


Figure 3.10 Débit estival à la station 030314 en 2001

Toutefois, les années ne se ressemblent pas toutes et n'ont pas toutes donné lieu à des débits aussi critiques qu'en 2001. Par exemple, les débits de l'année 2010 à Cowansville sont présentés à la figure 3.11. On observe pour cette année que le débit est à peine descendu sous le niveau d'alerte quelques jours.

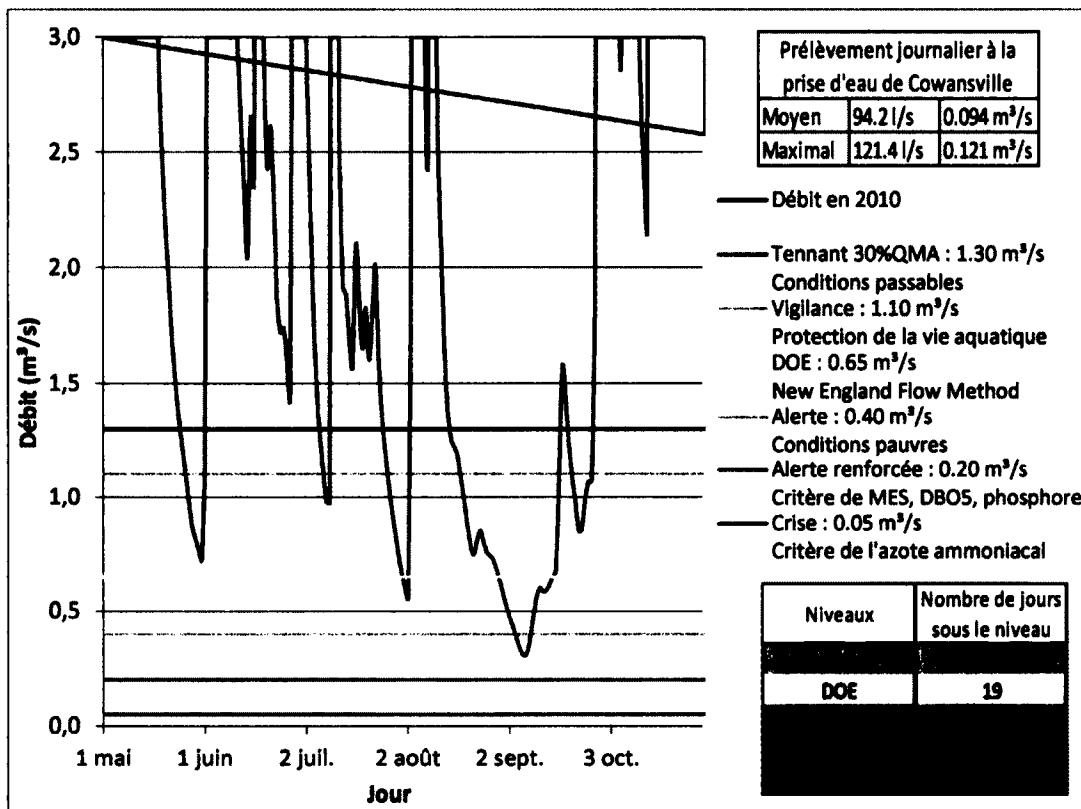


Figure 3.11 Débit estival à la station 030314 en 2010

Le nombre de jours où le débit est descendu sous chacun des niveaux d’alerte a été comptabilisé pour aider à l’établissement de la viabilité du système d’alerte. Le tableau 3.10 présente le nombre d’années où le débit est descendu sous chacun des niveaux d’alerte pour les principales municipalités sur le bassin versant.

Pour Bromont et Granby, les niveaux d’alerte sont déterminés à l’aide des débits de la station 030314 auxquels des ajustements ont été faits pour tenir compte de la superficie du bassin versant, tel que présenté à la section 3.5. Les débits mesurés aux stations 030309 et 030351 ont ensuite été utilisés pour en déterminer le nombre de jours où le débit est descendu sous chacun des niveaux d’alerte. Pour la station 030351, qui est située à la sortie du Lac Brome, un ajustement avec l’apport naturel du bassin versant du Lac Brome a été fait, selon l’équation du bilan de masse et du niveau du réservoir, transposé et ajusté à la superficie du sous-bassin situé entre la station de mesure et la prise d’eau de Bromont. Pour

Granby, un ajustement a été fait avec l'apport naturel du réservoir Choinière, transposé et appliqué à la superficie du sous-bassin situé entre la station de mesure et la prise d'eau.

Des résultats plus détaillés du nombre de jours sous chacun des niveaux sont présentés à l'annexe C.

Tableau 3.10 Nombre d'année sous chacun des niveaux d'alerte

Ville	Nombre d'années de données	Nombre d'années en vigilance	Nombre d'années en DOE	Nombre d'années en alerte	Nombre d'années en alerte renforcée	Nombre d'années en crise
Farnham	45 ans	45	45	44	29	8
Granby	32 ans	10	3	0	0	0
Cowansville	32 ans	32	32	29	18	6
St-Hyacinthe	20 ans	20	20	19	13	4
Bromont	5 ans	5	5	4	3	0

Selon l'application du système d'alerte aux années passées, le niveau de crise est atteint environ 2 fois par période de 10 ans, et ce, pour des durées allant d'une seule journée à plusieurs jours au cours d'un même été. Il est donc raisonnable de considérer l'application de mesures de restriction plus sévères pour ces périodes, périodes qui ne sont ni trop fréquentes, ni d'une durée très longue.

Dans le cas de la municipalité de Granby, le débit dans la rivière est pratiquement toujours supérieur au niveau d'alerte DOE. Le contrôle du débit au barrage du réservoir Choinière en amont permet cette gestion de la ressource en eau.

3.7 Proposition de méthodes de prévision des débits

Afin d'aider les gestionnaires des stations de filtration et des barrages en cas de sécheresse prolongée, le système d'alerte aux débits d'étiage doit comprendre un outil permettant de prévoir les débits des jours suivants. Différentes méthodes ont été analysées pour effectuer une prévision sur un horizon de 7 jours. Les méthodes retenues dans la présente étude sont le tarissement de la rivière et la méthode empirique des k plus proches voisins.

3.7.1 Analyse du tarissement à l'aide de la méthode des moindres carrés

Une première analyse du tarissement de la rivière Yamaska a été faite en se basant sur la méthode de détermination du tarissement proposée par Lang et al. (2006). Les épisodes de tarissement sont définis comme une période au cours de laquelle les contraintes suivantes sont respectées :

- Les précipitations journalières sont inférieures à 1 mm
- Les débits sont décroissants
- Le débit initial de la séquence est inférieur au débit moyen historique
- Les valeurs des débits ne s'éloignent pas de plus de 5 % d'une droite de tendance des 3 derniers jours de la séquence
- Les premiers jours de chacune des séquences doivent être supprimés car ils correspondent au temps de ressuyage.

En plus des différentes opérations statistiques qui sont effectuées sur les coefficients de tarissement (loi de Maillet) de ces séquences dans le but d'en déterminer l' α maître, le coefficient de tarissement de chacune des séquences est déterminé. L' α moyen peut donc être déterminé, ainsi que l'intervalle de confiance 25 % - 75 %.

Les coefficients de tarissement ainsi obtenus sont ensuite comparés aux situations réelles qui ont été observées dans la rivière au cours des dernières années. Cette technique ne permet toutefois pas de présenter une bonne prévision des débits, particulièrement pour les périodes chaudes et avec des débits très petits, donc en périodes d'étiages sévères.

Cette même démarche a été faite, mais en utilisant l'équation développée par Tison (1960) au lieu de la loi de Maillet. Encore une fois, les résultats ne correspondent pas aux attentes d'un modèle de prévision pour le système d'alerte aux étiages.

Une des raisons qui explique ces résultats est l'utilisation des séquences de tarissement autant en période estivale qu'en période hivernale. Les températures plus chaudes et les heures d'ensoleillement plus longues font en sorte que des phénomènes tels que l'évaporation sont plus importants en été qu'en hiver et donc que le coefficient de tarissement doit être plus élevé en été qu'en hiver.

Pour corriger cette situation, seules les séquences de tarissement de la période estivale, qui s'étend du 1^{er} mai au 31 octobre, ont été retenues. Les résultats obtenus avec cette nouvelle contrainte sont plus plausibles, plus près de la réalité, mais encore incorrects lors d'étiages très sévères, en présence de débits très faibles.

En utilisant toujours les séquences de tarissement proposées par Lang, avec la loi de Maillet, plusieurs coefficients de tarissement ont donc été déterminés, en fonction de différents facteurs :

- en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0);
- en fonction de la température maximale des 7 jours précédents le jour 0 (moins de 23 degrés et plus de 23 degrés);
- en fonction de la température maximale 7 jours suivants le jour 0 (moins de 23 degrés et plus de 23 degrés);
- en fonction du débit initial et de la température maximale des 7 jours précédents le jour 0.

Les coefficients de tarissement ainsi obtenus sont ensuite comparés aux situations réelles qui ont été observées dans la rivière au cours des années disponibles. Pour comparer les valeurs des débits mesurés aux différentes stations avec les valeurs obtenues selon les différents coefficients de tarissement, la méthode des erreurs quadratiques moyennes (RMSE pour root mean square error) et la méthode des biais ont été utilisés. Pour chacune

des séquences, le RMSE est calculé pour les différents coefficients de tarissement et la plus petite valeur du RMSE représente le coefficient de tarissement qui s'applique le mieux à la séquence. Le biais permet aussi de déterminer si un coefficient présente des prévisions pessimistes ou optimistes par rapport au débit mesuré. La figure 3.12 suivante illustre l'erreur associée aux prévisions.

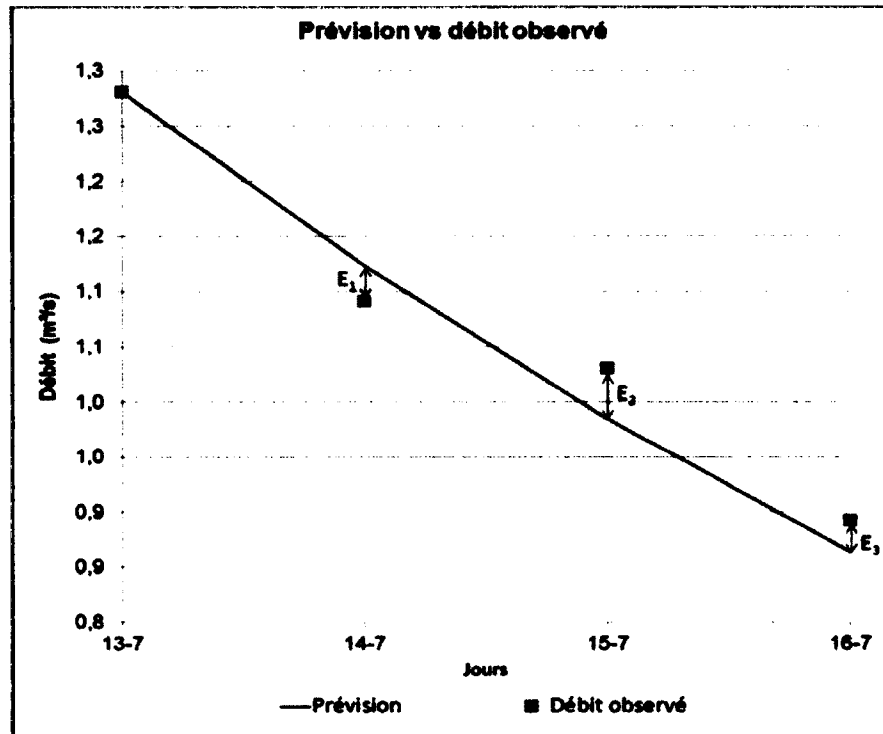


Figure 3.12 L'erreur associée aux prévisions

Le RMSE est déterminé à l'aide de l'équation 3.2 suivante :

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum ((Q_{prévu} - Q_{observé})^2)}}{n} = \sqrt{\sum (Erreur^2)} \quad (\text{éq. 3.2})$$

Le biais est quant à lui déterminé à l'aide de l'équation 3.3 suivante :

$$Biais = \sum (Q_{prévu} - Q_{observé}) = \sum Erreur \quad (\text{éq. 3.3})$$

Dans le cadre de cette étude, les prévisions à l'aide des 4 coefficients présentés ci-dessus ainsi que les coefficients de tarissement de la méthode de Lang (alpha maître et alpha moyen) ont été comparés. L'analyse a été effectuée sur 3 stations hydrométriques différentes (030302, 030304 et 030314) comportant un historique de débits important.

L'analyse de la méthode des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) a permis de faire ressortir que les coefficients de tarissement en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0) et les coefficients en fonction du débit initial et de la température maximale des 7 jours précédents le jour 0 sont ceux qui représentent le mieux la réalité et ils présenteraient donc le meilleur modèle mathématique pour décrire le comportement de la rivière en tarissement. Ce modèle est présenté à l'équation 3.4 suivante :

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (\text{éq. 3.4})$$

- Où :
- Q : Le débit pour la prévision du jour t , en m^3/s
 - Q_0 : Le débit au moment de commencer la prévision, en m^3/s
 - t : Le temps, en jours
 - α : Le coefficient de tarissement

Les résultats provenant de l'analyse du biais comportent plusieurs éléments. Tout d'abord, le total du biais n'est pas représentatif d'une réalité précise, car les erreurs positives et négatives (surestimation et sous-estimation) peuvent s'annuler. Par contre, il est possible de déterminer si une méthode tend à surestimer ou à sous-estimer les débits à l'aide du biais. L'analyse des résultats permet de conclure que l'alpha maître et l'alpha moyen tendent à surestimer la valeur des débits. Les coefficients de tarissement qui ont les biais les plus faibles en surestimation sont les coefficients en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0) et ceux en fonction du débit initial et de la température maximale des 7 jours précédents le jour 0. Cela signifie que ces deux méthodes de prévision représentent plus fréquemment un scénario pessimiste. Pour les prévisions des étiages, il est préférable d'avoir un scénario légèrement pessimiste que trop optimiste, car les actions prises en

prévision d'un étiage sévère ne peuvent pas nuire à la condition de la rivière tandis que des prévisions trop optimistes peuvent entraîner une inaction qui risque de causer des dommages à l'état de la rivière.

Ces deux analyses des erreurs permettent de conclure que les coefficients de tarissement en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0) et ceux en fonction du débit initial et de la température maximale des 7 jours précédents le jour 0 sont ceux qui s'appliquent le mieux. Ces deux différents coefficients obtiennent aussi des résultats semblables. Dans le cadre de notre étude, le coefficient de tarissement en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0) est celui qui s'applique le plus fréquemment selon le RMSE. De plus, dans la plupart de cas où il n'est pas le coefficient qui s'approche le plus près des débits observés, il présente des débits plus bas que ceux observés, donc il présente un scénario pessimiste, donc « sécuritaire » de notre point de vue. Pour ces raisons, le coefficient de tarissement en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0) est retenu dans cette étude pour la prévision des étiages selon le tarissement de la rivière.

3.7.2 Analyse de la méthode des k plus proches voisins

La méthode des k plus proches voisins peut aussi servir à la prévision des débits. Il faut disposer d'une base de données d'apprentissage qui correspond, dans notre cas, à l'historique des débits qui ont été observés dans le passé. Cette base de données est constituée d'un nombre élevé de couples « entrée-sortie », qui sont représentés par le débit d'une journée en entrée et les débits des 7 jours suivants en sortie. Pour estimer la sortie associée à une nouvelle entrée, on calcule sa distance à tous les éléments de la base, selon des paramètres prédéterminés. La valeur de k représente le nombre de sorties qu'on veut prendre en compte pour effectuer la prévision.

Si l'on cherche à prévoir les débits journaliers des prochains jours, il faut donc trouver, dans l'historique des débits, des situations présentant un point de départ semblable au débit ainsi que des conditions météorologiques semblables ou encore des conditions d'humidité semblables. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour prédire les débits des

prochains jours, ou encore pour en déterminer un intervalle de confiance modélisé [Fortin *et al.*, 1997]. Différentes techniques sont proposées dans la littérature pour déterminer la quantité (k) de situations à retenir pour cette prévision.

Dans cette étude, pour la prévision des débits d'étiage, les deux paramètres qui sont pris en compte sont la journée de l'année et le débit. Par contre, certaines situations ne sont pas indépendantes puisque les jours se suivent. Pour cette raison, lors de l'analyse de cette méthode, le nombre de situations (k) à retenir a été fixé à 12. Toutefois, afin de permettre une bonne représentation sur le portail web du système d'alerte aux étiages, le nombre de situations (k) à présenter sur le portail a été fixé arbitrairement à 8. Une plage de journées qui correspond à la date des observations ± 5 jours est un paramètre invariable. Les débits les plus semblables à celui de la journée de prévision des débits sont donc recherchés dans l'historique des débits.

Le tableau 3.11 suivant présente un exemple pour un débit de 0,5 m³/s observé le 4 août 2011 à Cowansville. Une recherche est effectuée pour les journées du 30 juillet au 9 août pour en déterminer les débits les plus près de 0,5 m³/s. On observe les huit situations retenues dans le passé (représentées en gras) dans ce tableau 3.11. Pour la prévision 7 jours, les débits correspondants aux 7 jours suivants ceux ayant une situation semblable dans l'historique sont utilisés.

Tableau 3.11 Exemple d'historique des débits

Année	30 juil.	31 juil.	1 août	2 août	3 août	4 août	5 août	6 août	7 août	8 août	9 août
2000	0.32	0.30	0.28	0.27	0.28	0.41	0.55	0.50	0.46	0.44	0.54
2001	0.29	0.26	0.25	0.22	0.20	0.17	0.15	0.12	0.09	0.08	0.08
2002	1.38	1.77	1.50	2.31	3.22	1.97	1.49	1.21	1.05	0.94	0.82
2003	0.33	0.30	0.27	0.24	0.22	0.21	0.33	1.63	2.16	1.86	7.28
2004	1.86	1.88	18.27	7.32	3.53	3.42	2.65	2.18	1.98	3.30	4.83
2005	1.66	1.30	1.04	0.85	0.74	0.65	0.57	0.52	0.46	0.40	0.34
2006	1.13	1.17	1.19	2.03	31.19	7.59	3.21	2.03	1.55	1.28	1.06
2007	0.71	0.64	0.58	0.51	0.48	0.96	1.33	1.83	2.76	2.44	1.87
2008	2.46	2.40	4.04	3.91	13.80	17.84	8.53	14.25	39.44	15.42	19.95
2009	1.69	1.42	1.36	1.42	3.15	2.50	2.09	2.13	2.26	2.15	1.75
2010	0.75	0.67	0.60	0.55	2.43	46.01	18.86	5.70	3.17	2.46	4.94

Un ajustement comprenant deux opérations doit être apporté, car le débit n'est pas exactement le même que celui observé. Il y a tout d'abord une translation des débits vers la date des prévisions et ensuite un ajustement des débits pour que le débit initial de la séquence corresponde avec le débit observé. Le tableau 3.12 présente un exemple d'ajustement effectué sur une série de débits pour obtenir une prévision 7 jours.

Tableau 3.12 Ajustement des débits pour la méthode des k plus proches voisins

Jour	Débit observé en 2011	Débit en 2000	Translation des débits vers la date voulue	Différence (2011 et 2000)	Prévision avec ajustement
4 août	0.5		0.55	-0.5	0.50
5 août		0.55	0.50		0.45
6 août		0.50	0.46		0.41
7 août		0.46	0.44		0.39
8 août		0.44	0.54		0.49
9 août		0.54	0.64		0.59
10 août		0.64	0.69		0.64
11 août		0.69	0.97		0.92
12 août		0.97			

Cette méthode de prévision des débits a permis d'obtenir différents résultats des plus diversifiés. La figure 3.13 montre un exemple de prévision obtenu pour la station de Cowansville le 15 juillet 2011. Puisque cette méthode de prévision ne tient pas compte comme tel des précipitations (à part celle implicitement présentes dans les séquences utilisées), on observe dans certaines situations des débits qui augmentent dû à la présence de précipitations. Cette enveloppe inférieure des prévisions apporte tout de même un aperçu des débits qui ont été observés dans le passé en l'absence de précipitations. Le tarissement obtenu à l'aide de la méthode de Lang, à laquelle les modifications présentées à la section précédente ont été apportées, est aussi présenté à la figure 3.13 pour fin de complétude.

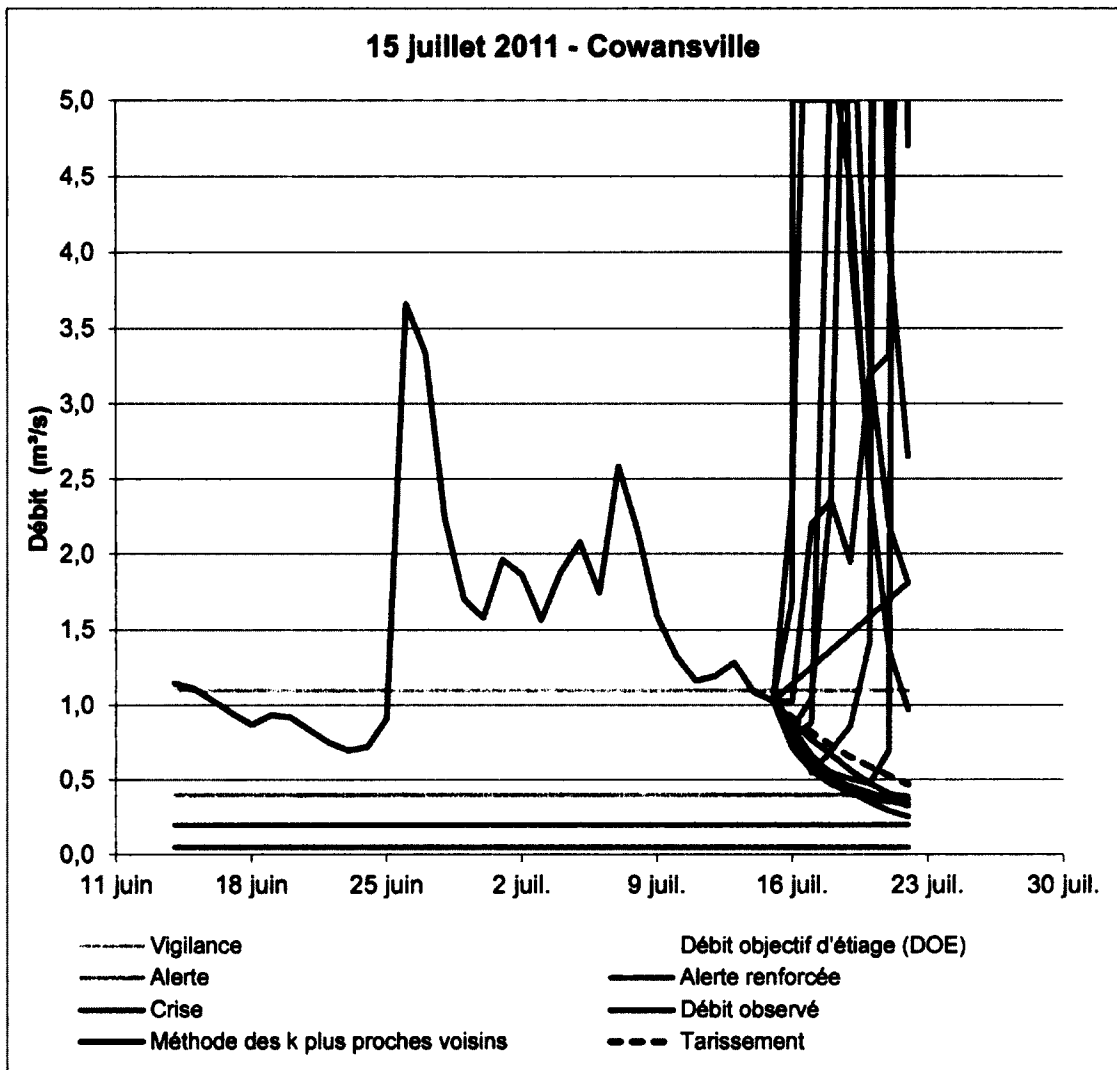


Figure 3.13 Exemple de prévision 7 jours des débits

Ces deux méthodes permettent donc d'obtenir une prévision des débits d'étiage qui présente les possibles débits qui seront atteints dans les prochains jours, bien que les prévisions météorologiques disponibles ne soient pas prises en compte. Ces prévisions permettent donc de déterminer s'il est plausible que les débits se retrouvent sous les différents niveaux d'alerte dans les 7 prochains jours.

3.8 Continuité entre les différentes stations

Pour mieux comprendre le comportement du bassin versant de la rivière Yamaska, certaines relations entre les différentes stations hydrométriques ont été analysées. Une analyse comparant l'addition des débits des trois branches amont de la rivière avec le débit d'une station hydrométrique située en aval permet de mieux cerner le comportement général du bassin versant. Aussi, une analyse des indices d'étiage en débit spécifique permet de comparer la situation des différentes municipalités entre elles.

3.8.1 Analyse de l'addition de différentes branches de la rivière

Afin d'améliorer la compréhension du comportement du bassin versant, l'addition du débit de différentes branches de la rivière est comparée aux valeurs de débit d'une station située en aval où les différentes branches de la rivière se rejoignent. Par exemple, l'addition des débits des stations 030314, 030351 et 030309 (Cowansville, Lac Brome et Granby) est comparée à la valeur des débits à la station 030302 (Farnham). Pour mieux représenter la situation réelle, un décalage est appliqué pour tenir compte du temps de transport. Les différentes hypothèses considérées sont les suivantes :

- Farnham (jour 0) comparé à Cowansville (jour 0) + Lac Brome (jour0) + Granby (jour 0)
- Farnham (jour 0) comparé à Cowansville (jour -1) + Lac Brome (jour-1) + Granby (jour -1)
- Farnham (jour 0) comparé à Cowansville (jour -1) + Lac Brome (jour-2) + Granby (jour -2)

Dans chacun des scénarios, le débit observé à la station de Farnham est supérieur à la somme des débits à Cowansville, Lac Brome et Granby pour l'année 2006 (figure 3.14) et la même situation s'applique pour les différentes années étudiées.

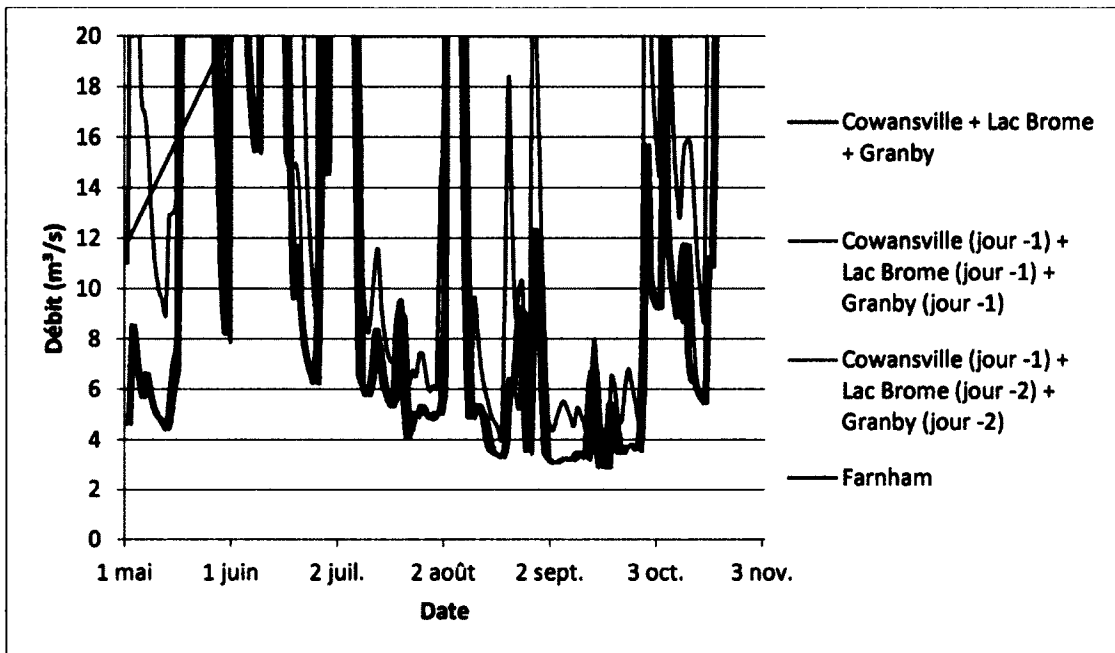


Figure 3.14 Débits à Farnham vs la somme des 3 stations en amont en 2006

La même comparaison a été effectuée entre les débits à St-Hyacinthe et la somme des débits à Farnham et en provenance de la rivière Noire. Les différentes hypothèses pour prendre en considération le temps de parcours de l'eau sont les suivantes :

- St-Hyacinthe (jour 0) comparé à Farnham (jour 0) + Rivière Noire (jour 0)
- St-Hyacinthe (jour 0) comparé à Farnham (jour -1) + Rivière Noire (jour -1)
- St-Hyacinthe (jour 0) comparé à Farnham (jour -1) + Rivière Noire (jour 0)

Les résultats de l'analyse sont différents pour cette comparaison. Il y a des périodes où le débit à St-Hyacinthe est plus faible que la somme des débits de Farnham et de la rivière Noire. Cette situation se reproduit sur plusieurs années. Par exemple, la figure 3.15 représente l'année 2009. Dans la plupart des cas, cette situation s'observe pendant la période comprise entre la mi-août et la fin septembre.

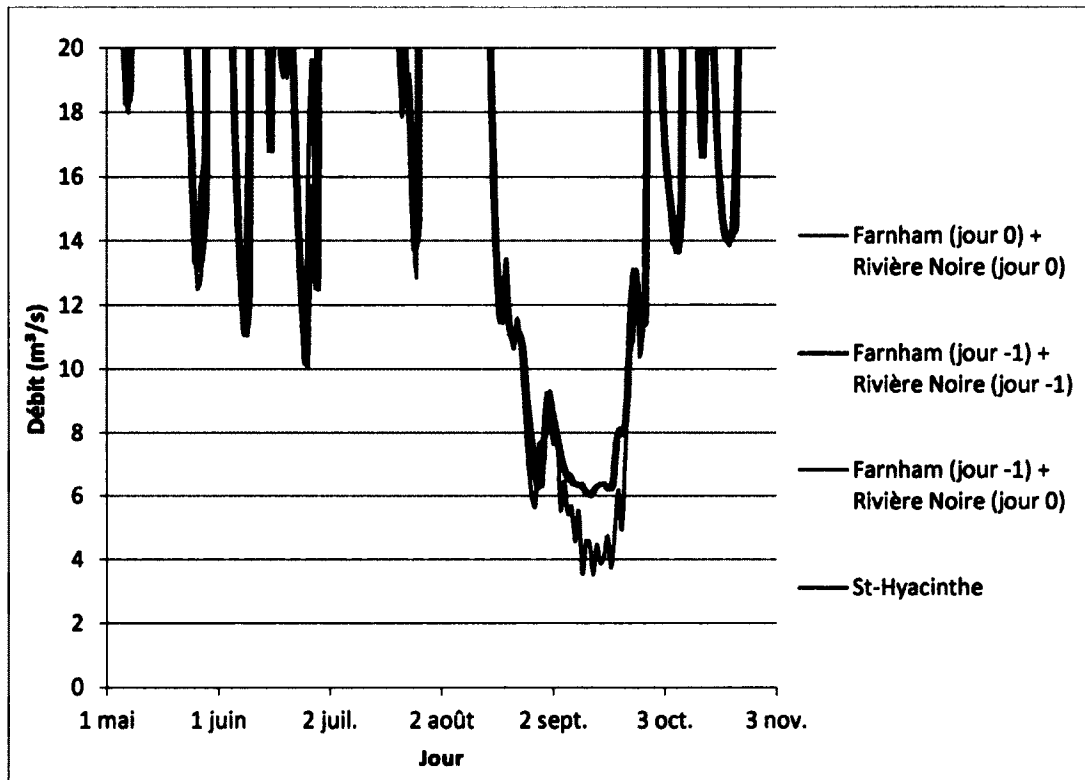


Figure 3.15 Débit à St-Hyacinthe vs la somme des débits à Farnham et de la Rivière Noire en 2009

Différentes causes potentielles sont mises de l'avant pour expliquer cette situation :

- La période au cours de laquelle les cultures de maïs ont besoin de beaucoup d'eau.
- Le niveau de précision des différentes stations
- La présence de prises d'eau sans pour autant avoir un rejet d'une quantité semblable (ex. usine de boîte de conserve...)
- La localisation de la prise d'eau et du rejet d'eau usée de St-Hyacinthe par rapport à la station de mesure hydrométrique.
- L'évapotranspiration
- Possibilité de certaines prises d'eau illicites
- La rivière contribuant à recharger la nappe

Certaines de ces suppositions ont pu être vérifiées, tels les rejets situés en aval des stations de mesure. Par contre, même en ajustant les débits pour prendre en compte des prélèvements, un déficit demeure à St-Hyacinthe par rapport à la somme des débits de

Farnham et de la rivière Noire. La figure 3.16 présente la situation en additionnant le rejet d'eau usée de Farnham et en soustrayant le prélèvement d'eau à St-Hyacinthe.

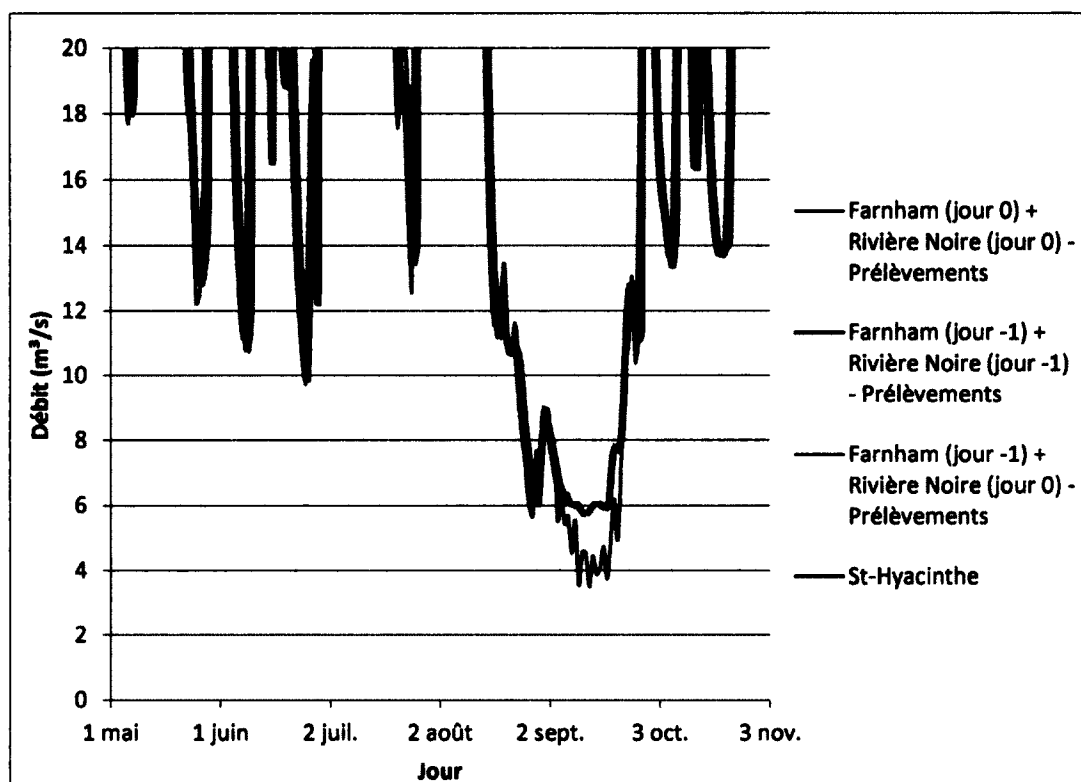


Figure 3.16 Débit à St-Hyacinthe vs la somme des débits à Farnham et rivière Noire en 2009 en tenant compte des prélèvements

Les débits plus faibles à St-Hyacinthe que la somme des débits en amont ne s'explique donc pas seulement avec le prélèvement (prise d'eau de St-Hyacinthe) situé en amont de la station de mesure. La municipalité de St-Damase possède aussi une prise d'eau entre Farnham et St-Hyacinthe, mais le rejet est aussi situé dans cette portion de la rivière. Certaines hypothèses restent donc à être éclaircies, mais l'imprécision de la mesure des débits est l'une des causes potentielles de la diminution des débits selon les lectures aux stations hydrométriques. Dans des situations de très faible débit, il est possible que la courbe de tarage ne soit pas très précise en raison des mesures prises pour construire cette courbe.

3.8.2 Analyse des débits spécifiques

Une autre analyse permettant de mieux comprendre le comportement général et spécifique du bassin versant de la Yamaska et de ses sous-bassins est de comparer les différents indices d'étiage à chacune des stations. Pour ce faire, les débits sont transformés en débits spécifiques (par km^2) pour pouvoir être comparés entre eux. La figure 3.17 présente les débits moyens journaliers (QMA) et les indices 7Q2 et 7Q10 en débit spécifique pour les principales stations de mesure. Pour cette comparaison, les débits de Cowansville, Farnham et St-Hyacinthe sont en régime naturel, donc les prélèvements ne sont pas considérés. Les prélèvements ne sont pas non plus pris en considération pour les stations de mesure à Lac Brome et Granby, mais les débits ne sont pas en régime naturel, car un contrôle du débit s'effectue avec la gestion des barrages et lac en amont.

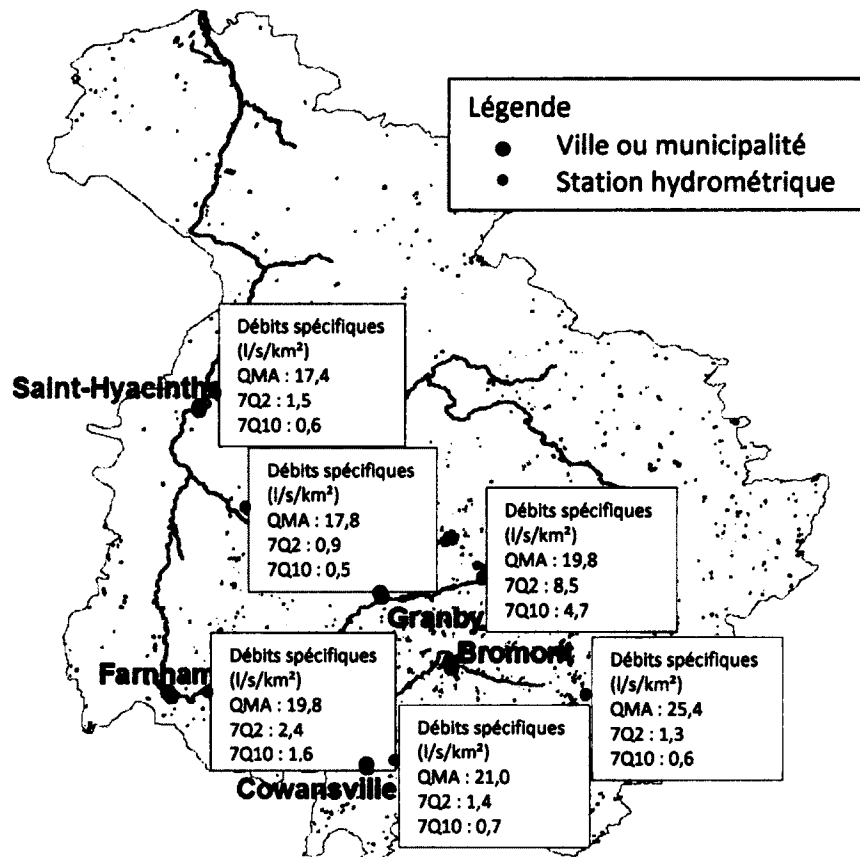


Figure 3.17 Les QMA, 7Q2 et 7Q10 en débit spécifique

Un résumé des différents indices d'étiage en débit spécifique est présenté aux tableaux 3.13 et 3.14.

Tableau 3.13 Les indices d'étiage en débit spécifique (l/s/km²)

Station	30301	30302	30304	30309	30314
Municipalité	Lac Brome	Farnham	Rivière Noire	Granby	Cowansville
Années	1935 - 1960	1966 - 2010	1966 - 2010 (sauf 1974)	1975 - 2010	1979 - 2010
Superficie (km²)	188	1230	1490	139	210
7Q2	1.5	2.4	0.9	8.5	1.4
7Q10	0.3	1.6	0.5	4.7	0.7
30Q5	0.9	2.5	1.0	6.9	1.4
Tenant					
QMA	20.8	19.9	17.8	19.8	21.0
30%	6.2	6.0	5.3	5.9	6.3
10%	2.1	2.0	1.8	2.0	2.1
Q ₅₀ août	3.2	4.6	2.7	10.9	3.6
Q ₅₀ septembre	5.6	4.8	2.8	10.8	3.6
Q ₅₀	13.6	10.1	7.2	12.9	9.5
Q ₉₅	1.2	2.6	1.1	7.4	1.7
Q ₉₀	2.4	3.4	1.6	9.4	2.4
0,5 QMA	10.4	9.9	8.9	9.9	10.5
0,25 QMA	5.2	5.0	4.4	4.9	5.3

Tableau 3.14 Les indices d'étiage en débit spécifique (l/s/km²) (suite)

Station	30340	30341	30345	030341 et 030345	30351
Municipalité	Aval de Granby	St-Hyacinthe	St-Hyacinthe	St-Hyacinthe	Lac Brome
Années	1984 - 2010	1984 - 1993	2001 - 2010	1984 - 1993, 2001 - 2010	2006 - 2010
Superficie (km²)	248	3310	3330	3320	190
7Q2	5.7	1.5	1.5	1.5	1.3
7Q10	4.4	0.5	0.7	0.6	0.6
30Q5	6.0	1.3	1.5	1.4	4.6
Tennant					
QMA	19.9	15.1	19.7	17.4	25.4
30%	6.0	4.5	5.9	5.2	7.6
10%	2.0	1.5	2.0	1.7	2.5
Q ₅₀ août	8.3	2.7	4.3	3.2	5.9
Q ₅₀	7.9	3.4	3.1	3.2	6.1
septembre					
Q ₅₀	12.1	7.3	9.9	8.5	18.7
Q ₉₅	6.0	1.3	1.8	1.5	2.0
Q ₉₀	6.7	2.0	2.5	2.3	3.6
0,5 QMA	10.0	7.5	9.9	8.7	12.7
0,25 QMA	5.0	3.8	4.9	4.4	6.4

Un des éléments qui ressort de cette analyse est que le débit moyen annuel (QMA) est très constant d'une station de mesure à l'autre. La valeur du QMA varie entre 15 et 25 l/s/km², avec 60% des valeurs entre 19 et 21 l/s/km² et une moyenne de 20 l/s/km². Tous les indices d'étiage qui sont dépendants du QMA sont aussi très constants pour toutes les stations. C'est le cas des indices de la méthode de Tennant et de la méthode du 0,25QMA.

La comparaison du 7Q2 et du 7Q10 montre que les stations de St-Hyacinthe, Cowansville, Lac Brome et la rivière Noire obtiennent des valeurs très semblables, tandis que les stations de Granby et Farnham obtiennent des valeurs différentes. La principale cause qui explique les différences est une régularisation des débits au barrage de Granby. La ville de Farnham, qui est située en aval de Granby, ressent aussi les effets de cette régularisation, mais dans une moindre mesure.

Pour l'indice 30Q5, les stations de St-Hyacinthe, Cowansville, Lac Brome (1935 à 1960) et la rivière Noire obtiennent des valeurs très semblables. Encore une fois les stations de Granby et Farnham obtiennent des résultats différents. C'est aussi le cas de la station la plus récente (2006 à 2010) située à Lac Brome. Cela s'explique encore une fois par une régularisation des débits, dont la régularisation au barrage de Lac Brome qui est plus importante depuis quelques années.

L'indice de la méthode NEFM (New England Flow Method) qui est représenté par la médiane du mois d'août ou de septembre suit la même tendance que les indices statistiques de faible débit (7Q2, 7Q10 et 30Q5), tout comme les indices des fréquences de dépassement de 90% et 95% (Q_{90} et Q_{95}).

3.9 Détermination des mesures de restriction

Pour que le système d'alerte apporte un effet sur la quantité d'eau prélevée, des mesures de restriction doivent être associées à chacun des niveaux d'alerte. Aussi, les mesures de restriction qui sont associées aux différents niveaux d'alerte peuvent varier d'un site à l'autre pour tenir compte de la vulnérabilité réelle de la demande en eau et celle des habitats écologiques [Bérubé, 2007; Nantel, 2006]. Une première hiérarchisation des mesures de restriction est proposée à la figure 3.18 suivante.

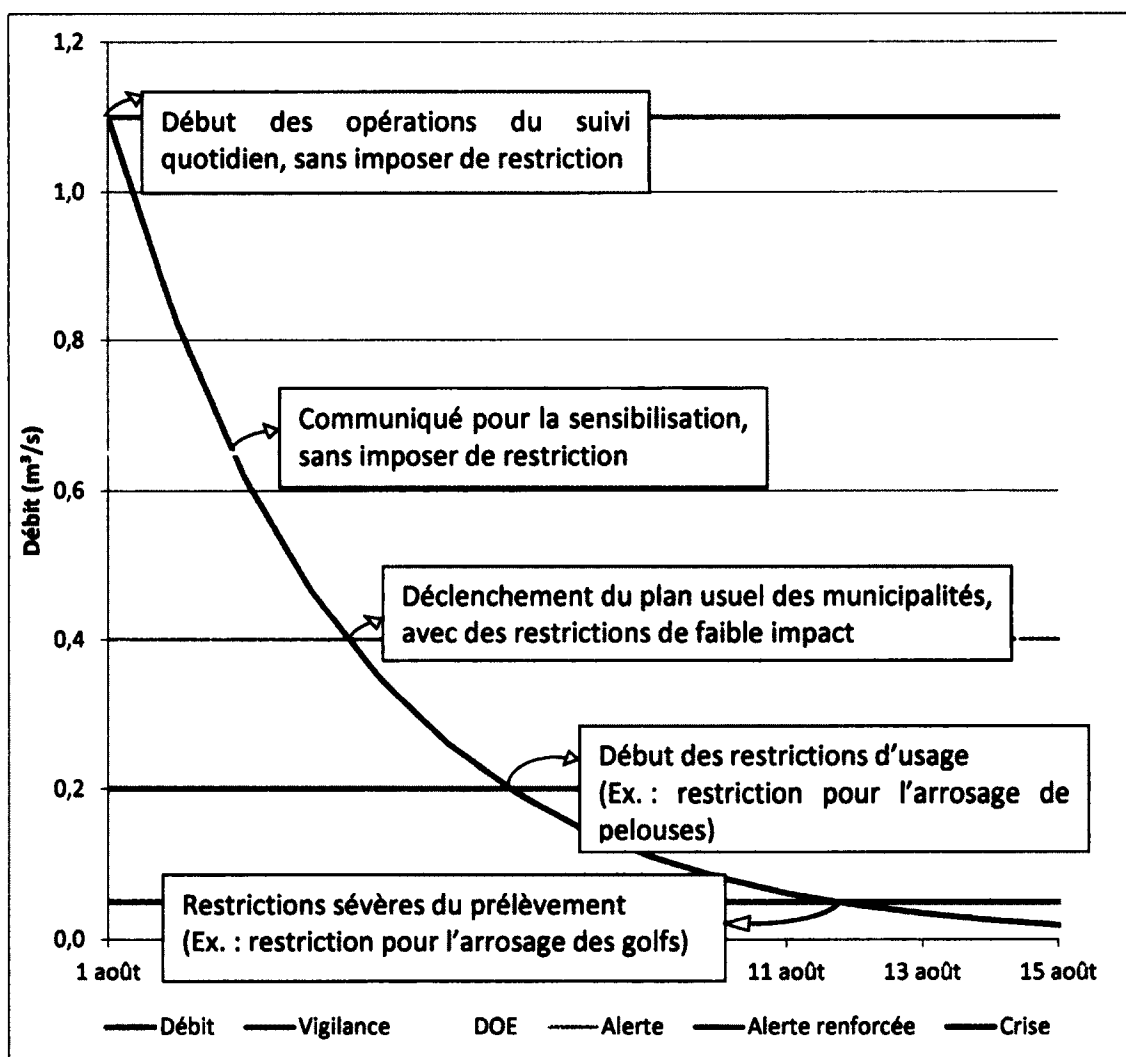


Figure 3.18 Hiérarchisation des mesures de restriction

Les mesures de restriction s'appliquent aux différents utilisateurs de la ressource. Les principales utilisations de l'eau sont faites pour l'usage domestique privé, l'usage domestique public, l'usage industriel et l'usage agricole. Une liste non exhaustive de différentes mesures de restrictions est présentée dans les tableaux 3.15 et 3.16 suivants.

Tableau 3.15 Exemples de mesures de restriction

Usage	Niveaux proposés
UTILISATIONS RÉSIDENTIELLES	
Lavage des voitures	Jours pairs / impairs, interdiction les heures d'ensoleillement ou interdiction totale
Arrosage des pelouses (sauf en cas de travaux paysagers où un permis est nécessaire)	
Arrosage des potagers	
Remplissage des piscines	
Remplissage des plans d'eau artificiels	
Nettoyage (à l'eau) des entrées privées	
Nettoyage des façades et terrasses	
*** Les mesures de restriction ne sont pas applicables si l'eau provient de réserves pluviales (barils d'eau de pluie)	
UTILISATIONS COMMUNAUTAIRES	
Lavage des voitures dans les lave-autos (sauf pour les véhicules d'urgences)	Permis dans les stations munies d'un système de recyclage ou interdiction totale
Arrosage des espaces verts publics	Jours pairs / impairs, interdiction les heures d'ensoleillement ou interdiction totale (sauf pour les départs et/ou les verts des golfs qui sont permis la nuit)
Arrosage des espaces sportifs	
Arrosage des terrains de golf	
Alimentation des fontaines publiques (en circuit ouvert)	Interdit
Lavage des rues et des trottoirs	Interdit (sauf en cas de travaux)
Rinçage du réseau d'aqueduc	
Remplissage des piscines publiques	Interdiction les heures d'ensoleillement ou interdiction totale
Remplissage des pataugeoires	Permis un nombre de fois par semaine ou interdiction totale
Arrosage de la glace des arénas	

Tableau 3.16 Exemples de mesures de restriction (suite)

Usage	Niveaux proposés
UTILISATIONS INDUSTRIELLES	
Surveillance	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement
Diminution	Diminution au compteur d'un pourcentage qui dépend du niveau d'alerte
UTILISATIONS AGRICOLES	
Surveillance	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement
Grandes cultures :	
- Prélèvement dans les cours d'eau et dans leurs nappes d'accompagnement	Mise en place de tours d'eau (ex. 1 journée sur 2), interdiction les heures d'ensoleillement ou interdiction totale
- Prélèvement dans les nappes souterraines	Limitation d'un pourcentage qui dépend du niveau d'alerte ou interdiction totale
Irrigation par submersion	Interdiction les heures d'ensoleillement ou interdiction totale
Cultures légumières et maraîchères en plein champ	
Cultures sous serres	
Cultures spécialisées	
Bassinage des semis	
Abreuvement des animaux	Accès interdit directement dans le lit des cours d'eau
Réserves artificielles	Utiliser, si possible, de l'eau provenant de réserves artificielles
UTILISATIONS DIVERSES	
Travaux en rivière	Interdiction de construction de batardeaux
Stations d'épuration	Surveillance accrue des rejets
Activités récréatives	Inciter les acteurs à avoir des pratiques respectueuses vis-à-vis du milieu aquatique particulièrement vulnérable, Interdiction de parcourir le lit des cours d'eau à pied, à cheval ou en véhicule à moteur
Navigation	
Protection contre les risques d'incendie	Interdiction de mises à feu d'herbes, de broussailles, de talus, d'ordures, etc.

La sévérité des restrictions appliquées à chacun des niveaux d'alerte dépend de la vulnérabilité de chacune des municipalités. Une municipalité plus vulnérable devrait imposer des mesures de restriction plus sévères aux premiers niveaux d'alerte qu'une municipalité moins vulnérable qui peut se permettre d'attendre le niveau d'alerte renforcée ou le niveau de crise avant d'imposer des restrictions plus sévères. La détermination des mesures de restrictions associées aux niveaux d'alerte est aussi une décision politique qui doit être débattue par les différents intervenants pour chacune des municipalités.

L'annexe D propose un classement des mesures de restriction selon les différents niveaux d'alerte.

3.10 Effet anticipé des mesures de restriction

Pour déterminer l'effet d'un système d'alerte sur les débits dans la rivière, le bilan de masse de la rivière est réalisé. Pour y arriver, le pourcentage de diminution du prélèvement d'eau brute pour chacun des niveaux d'alerte est déterminé. Afin d'obtenir une première évaluation du bilan de masse, une hypothèse est faite pour la réduction des prélèvements pour chacun des niveaux d'alerte en se basant sur les mesures de restriction proposées pour chacun des niveaux d'alerte, tel que présenté au tableau 3.17. Cette hypothèse des diminutions est basée sur des discussions avec différents intervenants, mais n'a toutefois pas été validé avec l'application de ces mesures de restriction.

Tableau 3.17 Effet des mesures de restriction

Niveau	Diminution
Vigilance	0%
DOE	5%
Alerte	10%
Alerte renforcée	20%
Crise	30%

Par la suite, les débits en rivière sont calculés pour les années passées en supposant l'application d'un système comprenant de telles diminutions. L'analyse est effectuée sur les années ayant connu des débits sous le niveau de crise. Les résultats obtenus sont une diminution du nombre de jours sous les niveaux les plus critiques, principalement pour la municipalité de Cowansville, où la situation est plus problématique. Le tableau 3.18 suivant présente quelques-unes des années les plus critiques pour Cowansville.

On observe que le nombre de jours sous le niveau de crise diminue beaucoup (entre 50% et 100% pour les années présentées) et le nombre de jours sous le niveau d'alerte renforcée diminue aussi (entre 2% et 22%). La diminution du nombre de jours sous chacun des autres niveaux est négligeable. C'est donc pour les niveaux les plus critiques que le système d'alerte doit être le plus efficace.

Tableau 3.18 Effet du système d'alerte pour Cowansville

Année	Vigilance	Nombre de jours sous les niveaux			
		DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
1988 sans système	117	86	69	38	6
1988 avec système	117	86	64	36	3
1989 sans système	117	95	67	23	3
1989 avec système	117	95	66	18	0
1995 sans système	109	91	76	48	15
1995 avec système	109	91	76	44	8
1999 sans système	106	89	72	48	4
1999 avec système	106	89	72	41	1
2001 sans système	117	96	74	53	18
2001 avec système	117	96	74	52	6
2002 sans système	65	48	30	19	5
2002 avec système	65	48	30	18	0

Par contre, pour les villes de St-Hyacinthe et Farnham, l'effet d'un système d'alerte n'est pas aussi concluant. Le nombre de jours sous chacun des différents niveaux diminue peu pour St-Hyacinthe et le système n'a pratiquement aucun effet pour Farnham. Les tableaux 3.19 et 3.20 présentent quelques-unes des années les plus critiques pour St-Hyacinthe et Farnham.

Cette analyse n'a pas été effectuée pour les villes de Granby et Bromont car le débit à Granby ne descend pas sous le niveau de crise, ni même sous le niveau d'alerte. À Bromont, l'historique n'est pas assez complet pour faire cette analyse (2006 à 2010).

On observe pour St-Hyacinthe une légère diminution du nombre de jours sous les niveaux d'alerte, d'alerte renforcée et de crise. Cette diminution est seulement de quelques jours, ce qui est moins que pour Cowansville. Pour Farnham, l'application d'un tel système d'alerte a très peu d'effet sur le nombre de jours sous chacun des niveaux. Un effet est observable seulement pour l'année 1988, mais ce n'est qu'une diminution d'une journée sous le niveau d'alerte renforcée. Les municipalités de Farnham et St-Hyacinthe sont drainées par un gros sous-bassin, donc l'effet d'une restriction au niveau municipal est faible sur les débits en rivière.

Tableau 3.19 Effet du système d'alerte pour St-Hyacinthe

Année	Nombre de jours sous les niveaux				
	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
1987 sans système	119	95	65	36	8
1987 avec système	119	95	65	36	6
1988 sans système	108	94	71	43	6
1988 avec système	108	94	71	41	5
1989 sans système	125	115	106	63	0
1989 avec système	125	115	106	63	0
2002 sans système	89	70	47	32	6
2002 avec système	89	70	47	31	3
2003 sans système	87	70	55	23	1
2003 avec système	87	70	54	22	1

Tableau 3.20 Effet du système d'alerte pour Farnham

Années	Nombre de jours sous les niveaux				
	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
1988 sans système	102	91	60	33	2
1988 avec système	102	91	60	32	2
1989 sans système	99	91	55	16	1
1989 avec système	98	91	55	16	1
1991 sans système	92	85	67	47	12
1991 avec système	92	85	67	47	12
1995 sans système	92	84	58	31	1
1995 avec système	92	84	58	31	1
1999 sans système	103	97	69	44	2
1999 avec système	103	97	69	44	2

Pour les années n'ayant pas connu des périodes d'étiage sévères (sous le niveau de crise), l'effet du système d'alerte est parfois la diminution d'une ou quelques journées sous les différents niveaux d'alerte, mais de façon peu significative.

Cette analyse permet donc de conclure qu'un tel système d'alerte aux étiages permet de prévenir des débits d'étiage sévère dans la rivière, mais a peu d'effet sur les débits plus élevés que ceux correspondant au niveau de crise ou d'alerte renforcée. On observe aussi

que le système d'alerte a un effet plus important pour les endroits où la situation est la plus problématique, plus vulnérable et où les débits moyens sont plus faibles.

Cette analyse considère chacune des municipalités de manière individuelle. Il faut toutefois être conscient qu'une diminution des prélèvements affecte aussi le débit qui se retrouve aux stations en aval. Cette augmentation du débit en aval n'est toutefois pas significative, car une majorité de la quantité d'eau prélevée par la prise d'eau est par la suite rejetée par la station d'épuration en aval.

3.11 Guide des bonnes pratiques de consommation

Pour réduire la consommation domestique en eau potable au quotidien, il existe plusieurs actions qu'il est possible et facile d'entreprendre de façon individuelle [CAA-Québec, 2012; Réseau-Environnement, 2012]. Ces actions apportent un complément aux mesures de restriction pour le système d'alerte aux étiages.

Dans la cuisine :

- Placer un pichet d'eau dans le réfrigérateur pour éviter de laisser couler l'eau pour qu'elle devienne froide.
- Laver les fruits et les légumes dans un évier partiellement rempli d'eau permet d'économiser jusqu'à 5 litres d'eau à chaque fois.
- Composter les déchets alimentaires au lieu de les jeter dans le broyeur permet d'économiser beaucoup d'eau et aussi d'obtenir un bon engrais pour le jardin.
- Installer un aérateur de robinet à faible débit pour réduire de moitié l'utilisation d'eau.
- Dégeler les aliments aux micro-ondes ou dans le réfrigérateur quelques heures avant de les consommer plutôt que sous l'eau du robinet.
- Attendre que le lave-vaisselle soit rempli avant de le partir et utiliser un cycle de courte durée.

Dans la salle de bain :

- Prendre une douche de 5 minutes au lieu de 15 minutes permet d'économiser jusqu'à 200 litres d'eau.
- Utiliser une pomme de douche à faible débit ou un réducteur réglable.
- Fermer l'eau au moment de se brosser les dents, de se laver le visage ou de se raser permet d'économiser jusqu'à 12 litres d'eau par minute.
- Installer une laveuse à haut rendement pour économiser jusqu'à 80 litres d'eau par brassée.
- Remplacer les vieilles toilettes par de nouveaux modèles à très faible chasse d'eau, ou encore par des toilettes à double chasse d'eau. Les toilettes courantes (avant 1990)

utilisent entre 13 et 20 litres d'eau par chasse activée. Les plus récentes toilettes à très faible chasse d'eau (après 1990) utilisent un volume d'environ 6 litres par chasse et les toilettes à double chasse utilisent environ 3 et 6 litres d'eau dépendant de la chasse.

- Vérifier si la toilette présente des fuites en déposant quelques gouttes de colorant dans le réservoir. Après 30 minutes, si la coloration parvient à la cuve, c'est que le réservoir de la toilette n'est pas étanche.
- Réduire le volume d'eau utilisé par la toilette d'environ 20% en déposant une bouteille de plastique remplie d'eau ou une plaquette réductrice de volume de toilette dans le réservoir de la toilette.

À l'extérieur :

- Lors du nettoyage de l'aquarium, utiliser l'eau pour arroser les plantes. Il s'agit d'un bon engrais puisqu'elle est riche en azote et en phosphore.
- Laver les voitures avec un seau d'eau plutôt qu'avec un boyau d'arrosage pour économiser jusqu'à 300 litres d'eau.
- Installer un baril collecteur d'eau de pluie pour faire le jardinage, arroser les pelouses, etc. permet d'économiser jusqu'à 6 000 litres d'eau par année.
- Utiliser un balai pour nettoyer l'asphalte de l'entrée au lieu du boyau d'arrosage.
- Arrosez la pelouse et le jardin en matinée ou en soirée. Cela permet d'éviter que 40 % de l'eau d'arrosage s'évapore.
- Par temps sec, garder l'herbe à 6 ou 7 centimètres de longueur permet de mieux retenir l'eau. De plus, laisser l'herbe coupée sur la pelouse pour qu'elle soit plus résistante à la sécheresse et qu'elle soit fertilisée.
- Régler les arroseurs de façon à arroser la pelouse, et non le trottoir et la voie d'accès pour autos.
- Inutile de trop arroser si on craint une pénurie, le sol ne peut pas emmagasiner l'eau.
- Mettre du paillis (paille, sciures de bois ou feuilles, par exemple) sur les plates-bandes pour conserver l'humidité.
- Aérer le sol chaque année pour faciliter la pénétration de l'eau.
- Limiter les surfaces imperméables (asphalte, dalles, etc.) pour que le sol puisse absorber un maximum d'eau.
- Couvrir la piscine d'une toile solaire pour empêcher l'évaporation de l'eau.

- Pour éviter les pertes dans la piscine par débordement (éclaboussures), ne pas la remplir à plus de 20 cm du bord.

Ces différentes actions sont des mesures permettant une utilisation responsable de la ressource en eau sans toutefois en restreindre l'utilisateur. Chaque individu peut décider des actions qui lui permettent de garder la même qualité de vie, tout en portant une attention pour la ressource en eau.

3.12 Relation entre la qualité de l'eau et la quantité

Une investigation préliminaire a effectuée pour comparer la quantité d'eau avec la qualité de celle-ci. Certaines caractéristiques de l'eau brute lors du prélèvement à la prise d'eau ont été comparées avec le débit dans la rivière à la même journée. Les données obtenues proviennent de la municipalité de Cowansville. La période étudiée est du 1^{er} juillet 2001 au 30 septembre 2001 pour la prise d'eau de Cowansville. Cette période est la plus critique ayant été observée pour cette municipalité, qui est elle-même la plus vulnérable sur le bassin versant.

Deux principales observations ressortent de cette analyse. La première est que la température de l'eau est influencée par le débit dans la rivière, tel que représenté à la figure 3.19. On observe une augmentation de la température de l'eau avec la diminution des débits. En période d'étiage, la température de l'eau est donc habituellement plus élevée. C'est une situation qui a fréquemment été observée selon l'expérience de différents responsables du traitement de l'eau potable.

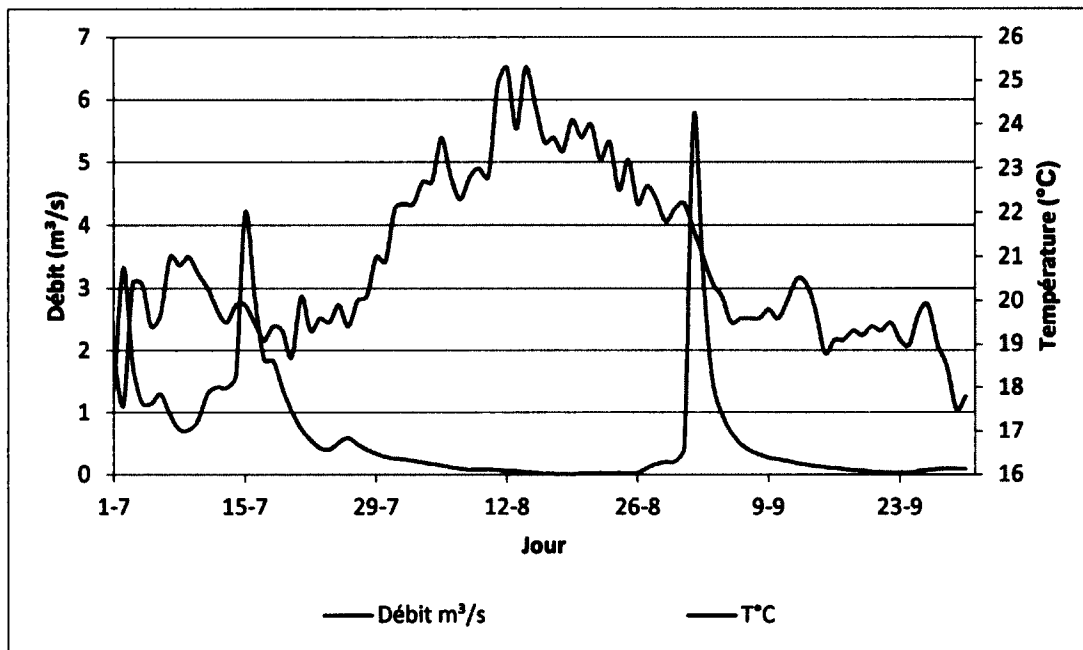
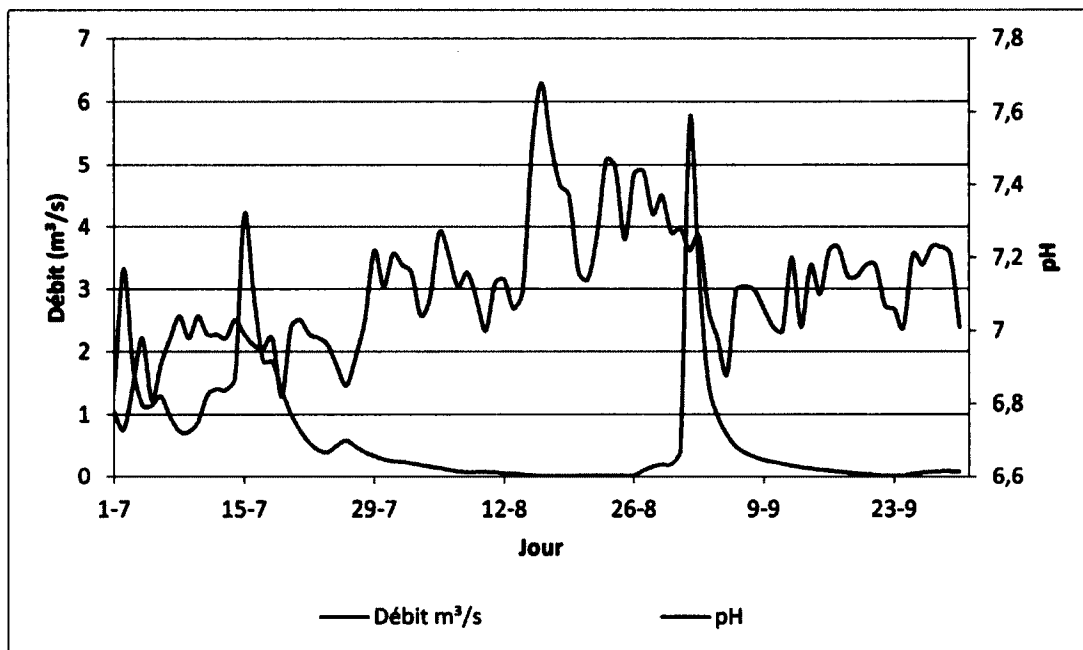


Figure 3.19 Relation entre le débit et la température de l'eau

En plus de la température, le pH varie avec le débit dans la rivière. Une diminution des débits entraîne une augmentation du pH pour la période étudiée. La figure 3.20 illustre cette situation.



Ces observations, ayant été réalisées sur une seule période, n'offrent pas la possibilité d'en tirer beaucoup de conclusions. Plusieurs périodes d'étiage doivent être analysées pour pouvoir obtenir des conclusions plus complètes. Une future étude plus détaillée à ce sujet fait donc partie des recommandations de ce projet, qui sont présentées à la conclusion.

3.13 Partage du système d'alerte

L'élaboration du système d'alerte aux étiages n'est pas complète sans le partage de l'information avec les utilisateurs de la ressource en eau. Pour qu'un tel système d'alerte ait un effet significatif, un mode de communication doit être adopté pour permettre l'échange de l'information avec les personnes concernées. Dans le cadre de ce projet, un portail informatique est l'outil retenu pour partager le système d'alerte aux étiages avec les partenaires du projet et, éventuellement, leurs populations.

Plusieurs éléments sont essentiels sur le portail informatique pour en permettre la bonne compréhension et ainsi en faciliter son utilisation. Une ébauche de portail informatique qui peut servir à présenter l'information du système d'alerte est présentée dans cette section.

Une carte représentant la localisation géographique des villes permet de situer l'utilisateur du portail (figure 3.21). Cette carte lui permet aussi de choisir la municipalité d'intérêt et de se diriger vers l'information correspondante ou vers l'information de la station de mesure hydrométrique la plus près de cette municipalité.

- Accueil
- Cowansville
- Bromont
- Granby
- Farnham
- Rivière Noire
- St-Hyacinthe
- Prévisions météo.
- Trucs et astuces
- Liens utiles
- Cartes

Accueil

Choisir une ville sur la carte pour obtenir les prévisions des débits



Figure 3.21 Aperçu de la page d'accueil du site web pilote

Pour chacune des municipalités, une page présente le débit moyen journalier sur la rivière Yamaska, selon la station hydrométrique correspondante. Ces données sont automatiquement recueillies une fois par jour sur le site du CEHQ. Les débits moyens journaliers sont ensuite conservés en mémoire pour une durée d'environ 3 mois et sont présentés sous la forme d'un graphique qui évolue chaque jour.

Sur le même graphique, les niveaux d'alerte apparaissent avec la prévision de débits pour les 7 jours suivants. La figure 3.22 présente la situation observée le 22 mai 2012 pour Cowansville. Dans cet exemple, on observe une prévision des débits selon la méthode du tarissement de la rivière ainsi que selon la méthode des k plus proches voisins (débits similaires). Une prévision des débits selon un modèle hydrologique peut aussi y être

montrée en tenant compte des prévisions météorologiques d'environnement Canada. Il s'agit toutefois d'une première ébauche de site internet et différentes modifications seront apportées avant de partager cet outil avec l'ensemble des personnes concernées.

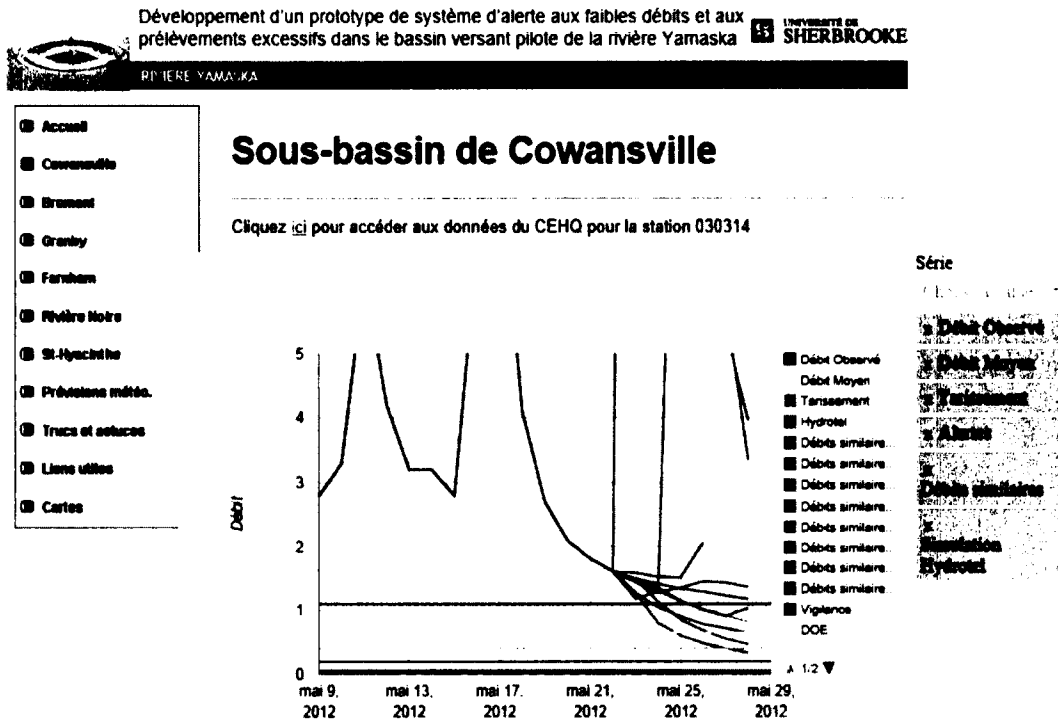


Figure 3.22 Aperçu des prévisions du jour pour Cowansville le 22 mai 2012

Il est important de mentionner que les débits moyens journaliers, mesurés au niveau des stations hydrométriques, sont transférés directement au serveur du portail sur le système d'alerte. Ces données ne sont pas validées et sont donc susceptibles de contenir des erreurs ou des imprécisions. Les données validées sont disponibles dans les jours suivants sur le site du CEHQ.

Les mesures de restriction associées à chacun des niveaux d'alerte doivent être mises de l'avant afin que les usagers du site n'aient pas de difficultés à trouver les actions qu'ils doivent entreprendre. Il doit être facile de repérer les mesures qui s'appliquent pour chacun des niveaux d'alerte. Pour une gestion de la ressource en eau par les utilisateurs résidentiels, une liste de trucs et astuces est disponible pour permettre à chacun de

s'éduquer sur les actions à entreprendre au quotidien et qui permettent d'utiliser l'eau de façon responsable et durable.

Pour suivre l'évolution des débits au cours des années, un historique présentant le nombre de jours sous chacun des niveaux d'alerte permet de comprendre le comportement de la rivière et de faire face aux changements climatiques. La figure 3.23 présente l'historique des 10 dernières années à Cowansville. Dans cet historique des 10 dernières années à Cowansville, on remarque que les années 2001 et 2002 ont connues des étiages plus sévères que les années plus récentes.

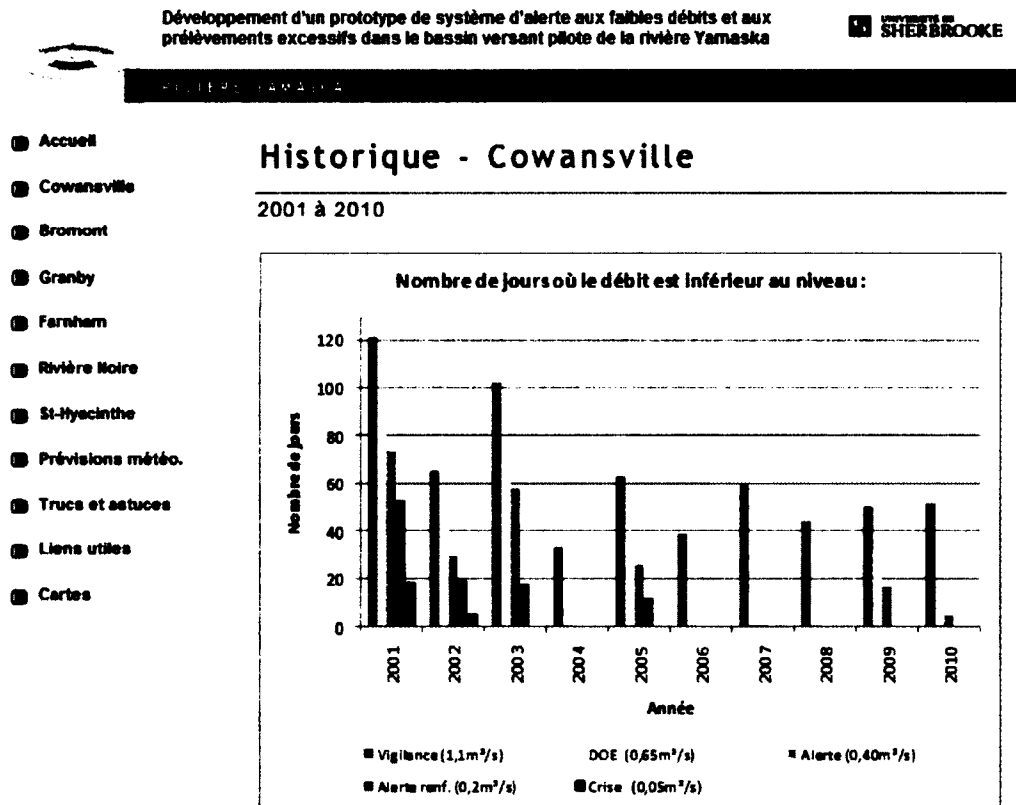


Figure 3.23 Aperçu de l'historique de Cowansville

La situation estivale observée au cours des dernières années est aussi une information pertinente à partager sur le site, car elle permet de comparer la situation actuelle avec celle des années antérieures. La figure 3.24 présente la situation observée en 2010 à Cowansville

et le nombre de jours durant lesquels le débit est descendu sous les différents niveaux d'alerte.

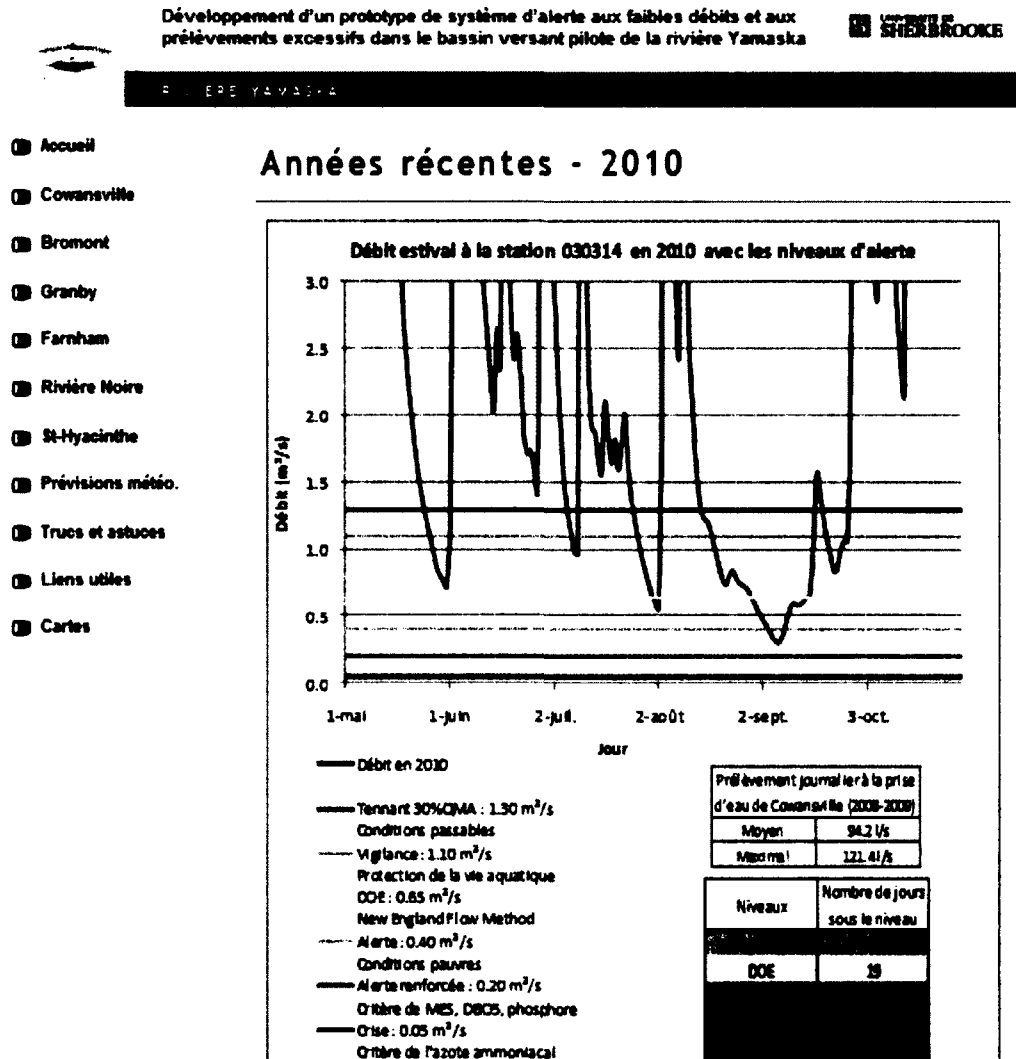


Figure 3.24 Aperçu de la situation observée en 2010 à Cowansville

Ces différents éléments du portail informatique présentant le système d'alerte aux étiages pour le bassin versant de la rivière Yamaska permettent d'obtenir l'information nécessaire à une bonne gestion des étiages. Ce prototype de système d'alerte pourra aussi évoluer pour tenir compte des changements climatiques ainsi que des spécificités de chacune des municipalités.

CHAPITRE 4 CONCLUSION

4.1 Synthèse des résultats

Cette étude a permis d'évaluer la vulnérabilité des principales municipalités du bassin versant de la rivière Yamaska. L'analyse des débits en rivière, de la pluviométrie, de l'occupation du sol et des réserves d'eau a permis de déterminer que Cowansville est plus vulnérable que les autres municipalités, principalement à cause des faibles réserves d'eau en amont de sa prise d'eau municipale.

Basé sur des systèmes d'alerte aux étiages existants ailleurs dans le monde, un prototype de système d'alerte a été développé pour le bassin versant de la rivière Yamaska. Ce système comporte les débits journaliers, une prévision des débits sur un horizon de 7 jours, des niveaux d'alerte reposant sur des critères hydro-écologiques ainsi que des mesures associées à ces différents niveaux d'alerte. Pour la prévision des débits, une méthode de tarissement « modifiée » ainsi que la méthode des k plus proches voisins ont été analysés. Les différents critères hydro-écologiques utilisés sont ceux qui sont les plus fréquemment utilisés au Québec et ceux qui s'appliquent le mieux à la situation du bassin versant de la rivière Yamaska.

L'application d'un tel système d'alerte dans le futur permettra d'augmenter le débit dans la rivière, et ainsi de protéger l'habitat aquatique pendant ces périodes d'étiage. L'effet de ces mesures est cependant plus important pour les municipalités situées en amont du bassin versant (Cowansville) que pour les municipalités situées plus en aval dans le bassin versant (Farnham et St-Hyacinthe) car les actions en milieu urbain se traduisent par des restrictions de prélèvement plus important par rapport au débit en rivière.

Une investigation sommaire de la qualité de l'eau en période d'étiage met à l'avant les différentes situations problématiques qui sont présentes. Une diminution des débits en période d'étiage cause une augmentation de la température et du pH. De plus, des traitements plus coûteux peuvent devenir nécessaires pour assurer le traitement de l'eau potable.

Il est important de mentionner que la situation dans le bassin versant de la rivière Yamaska serait très différente s'il n'y avait pas de lacs et de réservoirs en amont des différentes prises d'eau. Ces réserves offrent une protection et permettent aux prises d'eau d'être submergées, même en période d'étiage. À ce chapitre, il y a lieu de se questionner sur la faisabilité de remplacer le seuil en enrochement qui assure la submergence de la prise d'eau de Bromont, compte tenu de la nature des industries desservies. À tout le moins, nous recommandons un suivi serré de cet ouvrage.

4.2 Contributions apportées

Bien que certains systèmes d'alerte soient opérationnels dans le monde, peu de mesures sont présentes sur le bassin versant de la rivière Yamaska. Certaines restrictions sont mises en place pendant la période estivale pour imposer des restrictions sur la consommation de l'eau potable. Par contre, ces mesures ne tiennent pas compte du débit dans la rivière, mais seulement de la période de l'année. Un tel système d'alerte aux étiages vient compléter cette gestion de l'eau potable pendant la période estivale. Ce système permet de déterminer les moments où la rivière est en étiage et même d'en déterminer le degré de sévérité. Les mesures de restrictions associées aux différents niveaux permettent de mieux gérer la ressource en eau, sans pour autant apporter des restrictions lorsque ce n'est pas nécessaire.

Ce prototype de système d'alerte aux étiages peut aussi servir de modèle pour l'implantation d'un tel système dans les différents autres bassins versant du Québec. Les différentes étapes menant à l'élaboration d'un système complet et fonctionnel peuvent être reproduites pour un autre bassin versant, en tenant compte des caractéristiques spécifiques à chaque bassin versant.

Dans le cadre de ce projet, une étude approfondie a aussi été faite pour déterminer une façon optimale d'utiliser la méthode de prévision du tarissement menant à une prévision pessimiste, donc « sécuritaire » du point de vue du système d'alerte proposé.

4.3 Travaux futurs

Pour permettre d'améliorer les connaissances reliées à la problématique des étiages sur la Yamaska, certaines autres études et analyses pourraient être effectuées.

Tout d'abord, il serait pertinent de vérifier l'adéquation des indices écohydrologiques retenus par rapport à la condition aquatique, i.e. s'ils sont toujours représentatifs des critères écohydrologiques qu'ils sont censés représenter. Une telle démarche serait cependant assez coûteuse en vertu des efforts considérables requis sur le terrain.

Pour Bromont et Granby, une simulation avec un modèle hydrologique permettra de vérifier l'exactitude des niveaux d'alerte qui ont été évalués par transposition des débits à Cowansville dans cette étude. Ce même modèle peut servir à effectuer une prévision des étiages en tenant compte des prévisions de précipitations (travaux en cours).

Certaines améliorations sont aussi possibles pour raffiner la méthode de prévision des k plus proches voisins. Il est possible de porter une attention particulière aux conditions météorologiques prévues pour les 7 prochains jours dans le cas des prévisions et non pas seulement prendre en compte la valeur du débit. Les conditions météorologiques semblables peuvent aussi être un critère pour déterminer des séquences de débits pour les prévisions. Par contre, il faut être en possession d'un historique très complet et très étendu pour y arriver. Il existe aussi différentes autres méthodes de prévision des débits qui n'ont pas été analysées dans le cadre de cette étude. Nous croyons cependant que les méthodes proposées sont adéquates pour les fins visées par le système d'alerte.

Une analyse du risque devrait aussi être effectuée pour déterminer quels sont les points de contrôle critiques de ce système. Par exemple, le système d'alerte dépend fortement du bon fonctionnement des stations de mesures hydrométriques. Aussi, la plupart des municipalités possèdent une station de mesure des débits à proximité de la prise d'eau municipale. Ce n'est toutefois pas le cas pour Bromont et Granby. Il serait avantageux pour une meilleure gestion de la ressource en eau d'y prévoir l'installation d'une station hydrométrique.

Il a aussi été mentionné dans ce rapport que la diminution du débit entre Farnham et St-Hyacinthe n'est pas complètement expliquée et les hypothèses avancées n'ont pas pu être vérifiées dans le cadre de ce projet. Des recherches futures sur cette question pourraient en déterminer les raisons, en étant attentif au lien probable qui existe avec la nappe souterraine d'une surface à vocation de grandes cultures.

Enfin, l'investigation préliminaire de la qualité de l'eau en étiage repose sur l'analyse d'une seule période d'étiage sévère à la station 030314. Aucune conclusion n'a pu être mise de l'avant concernant les différents contaminants présents dans l'eau lors de cette analyse. Une analyse plus approfondie de cette relation entre la qualité de l'eau et le débit permettrait d'obtenir plusieurs autres informations à ce sujet. Pour y arriver, il serait intéressant de réaliser des prélèvements lors de périodes d'étiages sévères et ainsi obtenir plus d'information sur la qualité de l'eau en étiage. Un moyen intéressant pour y arriver est l'essai réalisé dans le cadre d'une maîtrise de type cours.

Pour les conditions futures du bassin versant, une étude de l'impact des changements climatiques sur les débits d'étiage et sur le nombre de jours sous chacun des niveaux du système d'alerte est en cours. Cette étude permettra d'adapter le système d'alerte selon les conditions anticipées en changement climatique. Aussi, certaines mesures d'adaptation sont à considérer, tel que le rehaussement des barrages des différents lacs et réservoirs qui permettrait d'augmenter la capacité d'emmagasinement en eau. Des mesures structurelles telles que l'installation de toilette à double chasse dans toutes les nouvelles constructions sont aussi à envisager.

Bien qu'une analyse du comportement du bassin versant de la rivière Yamaska en étiage ait été faite dans le cadre de ce projet, beaucoup de travail demeure à faire avant de mieux cerner tous les aspects reliés aux étiages sur ce bassin. Cette étude propose toutefois un bon aperçu des travaux nécessaires dans le futur pour y parvenir.

ANNEXE A: LES INDICES D'ÉTIAGE POUR LES DIFFÉRENTES STATIONS

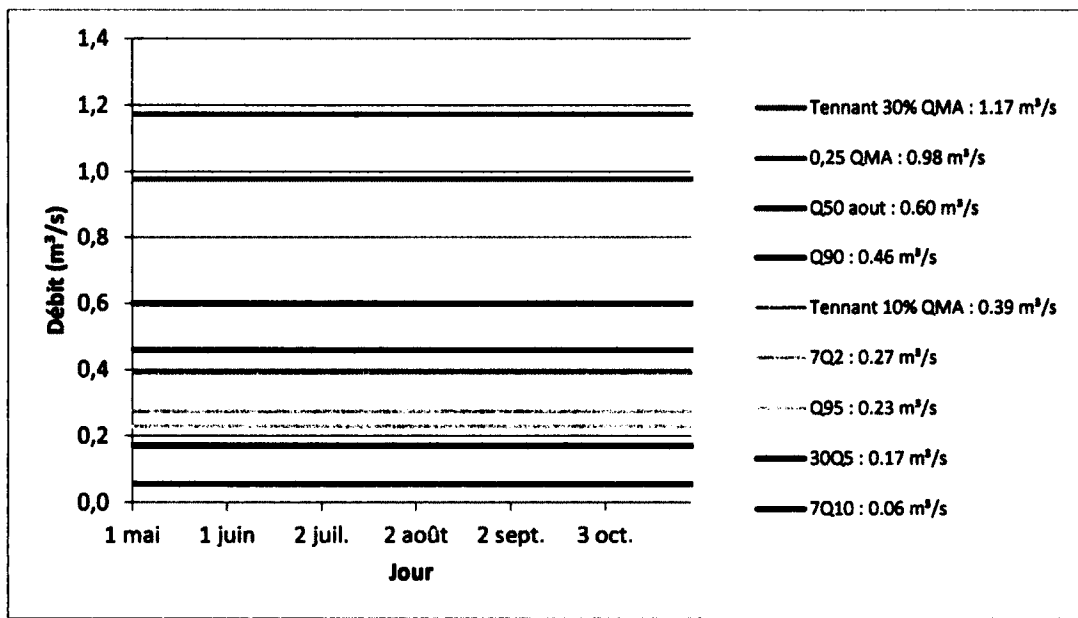


Figure A.1 Les indices d'étiage à la station 030301

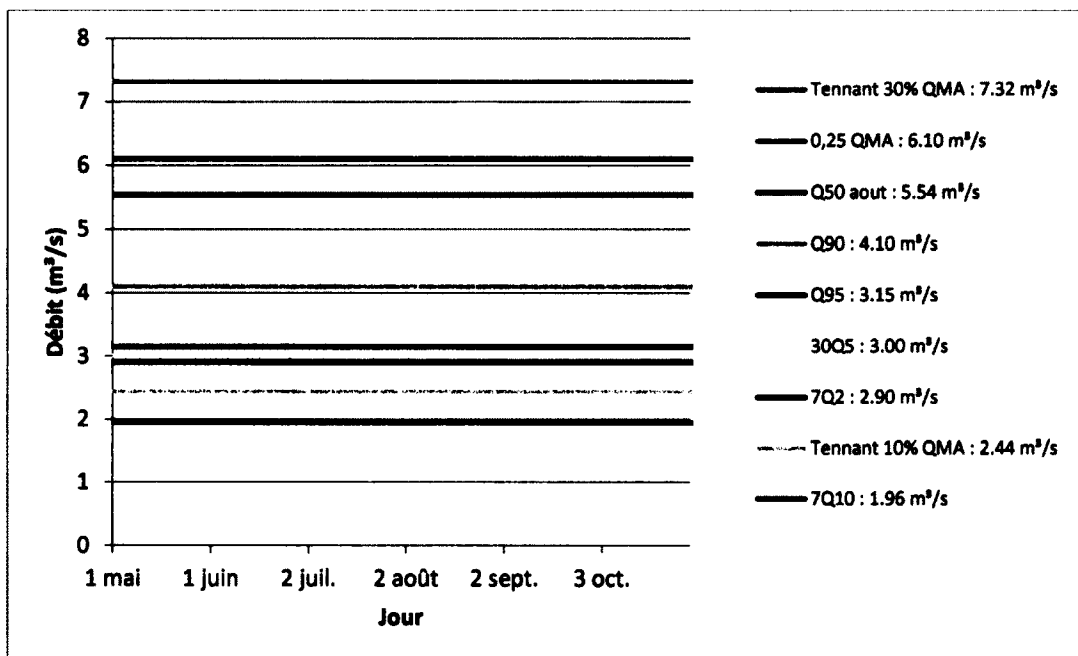


Figure A.2 Les indices d'étiage à la station 030302

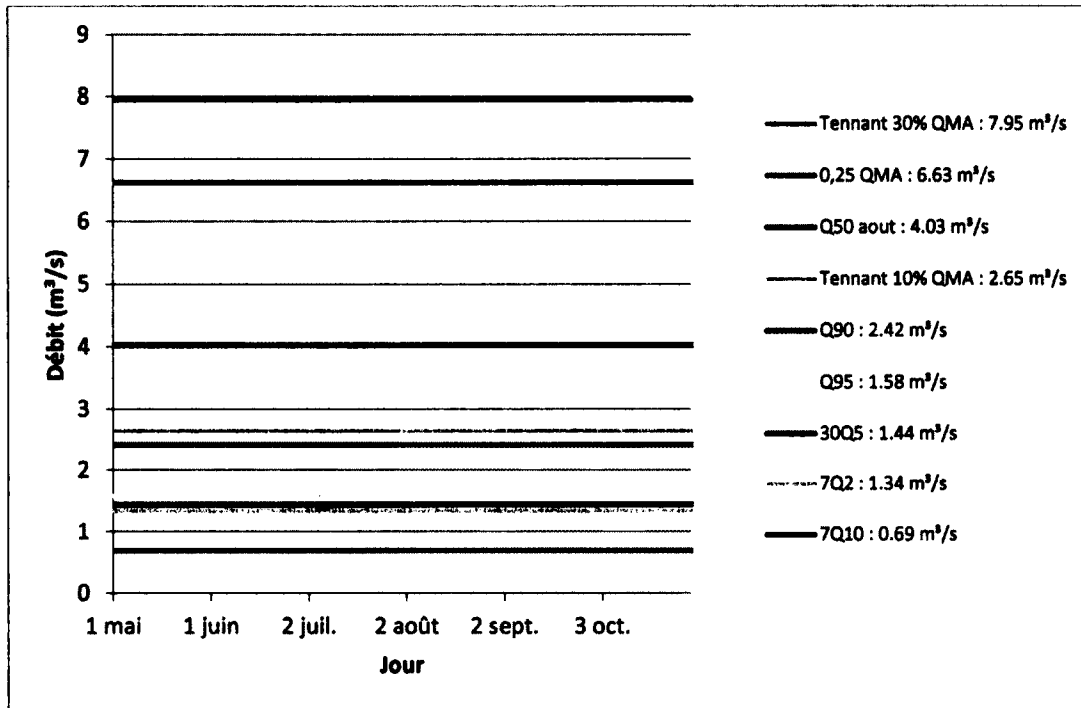


Figure A.3 Les indices d'étiage à la station 030304

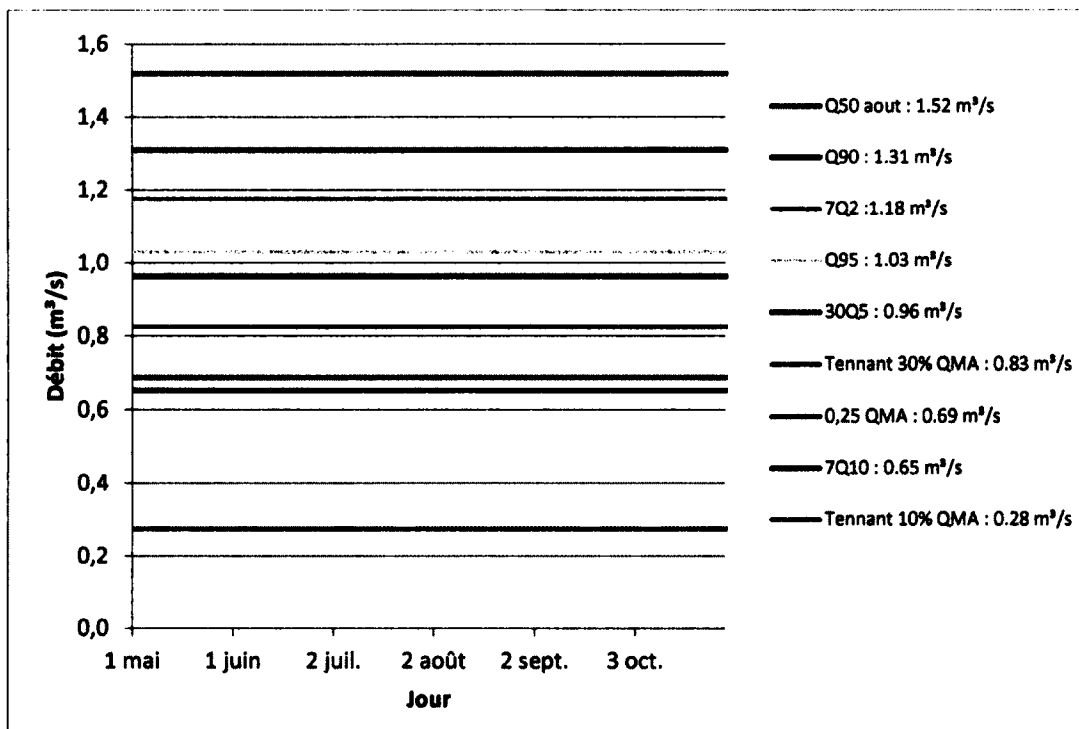


Figure A.4 Les indices d'étiage à la station 030309

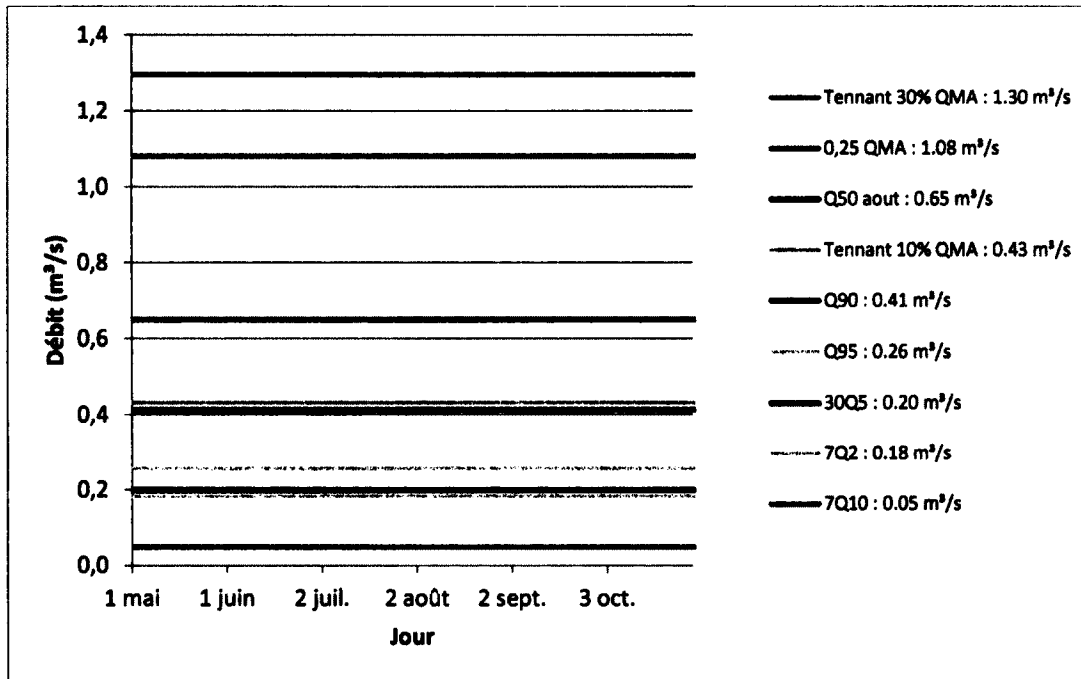


Figure A.5 Les indices d'étiage à la station 030314

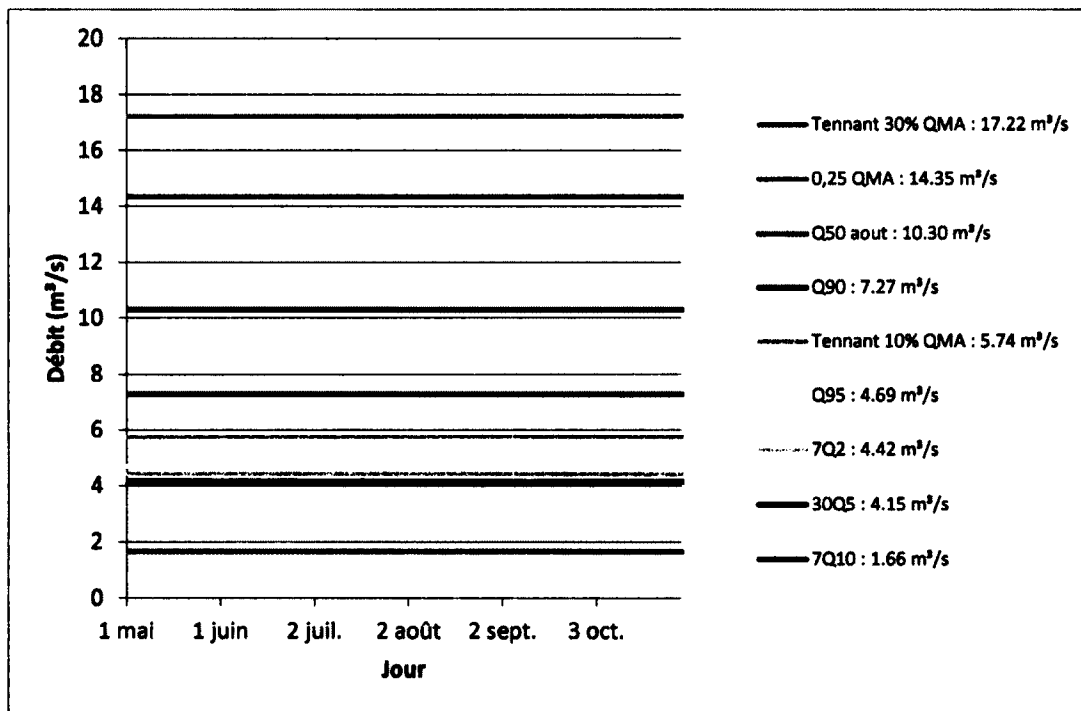


Figure A.6 Les indices d'étiage aux stations 030341 et 030345

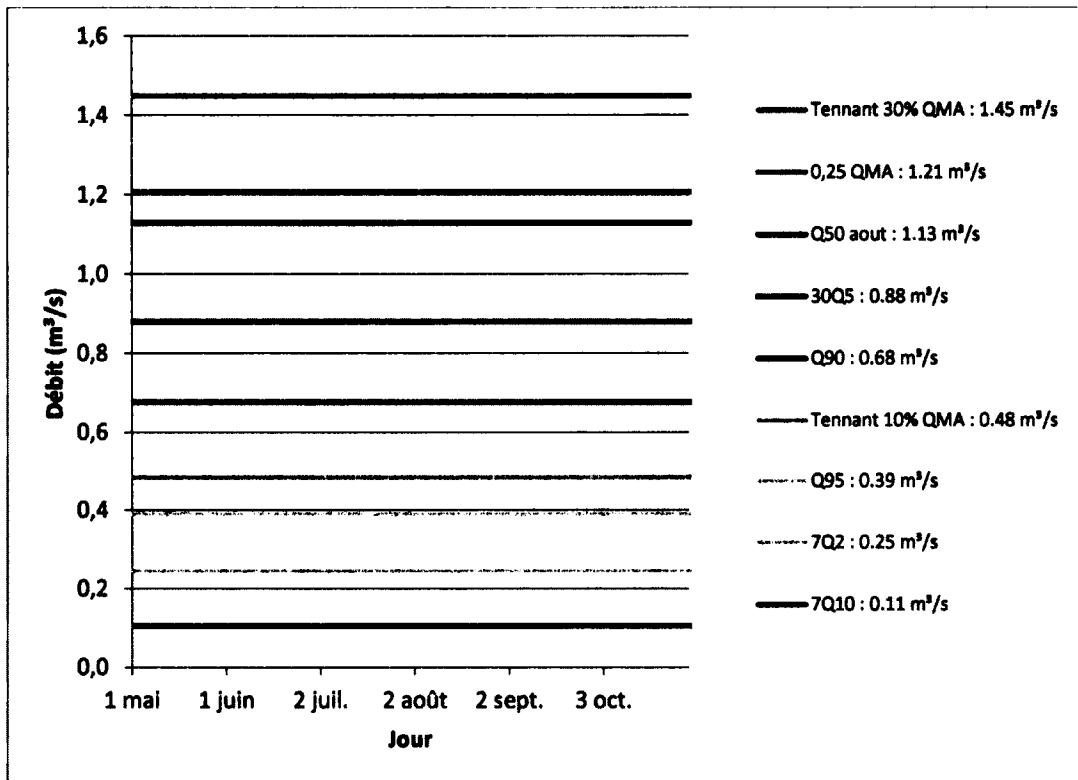


Figure A.7 Les indices d'étiage à la station 030351

ANNEXE B : LES NIVEAUX D'ALERTE PROPOSÉS POUR LES DIFFÉRENTES STATIONS

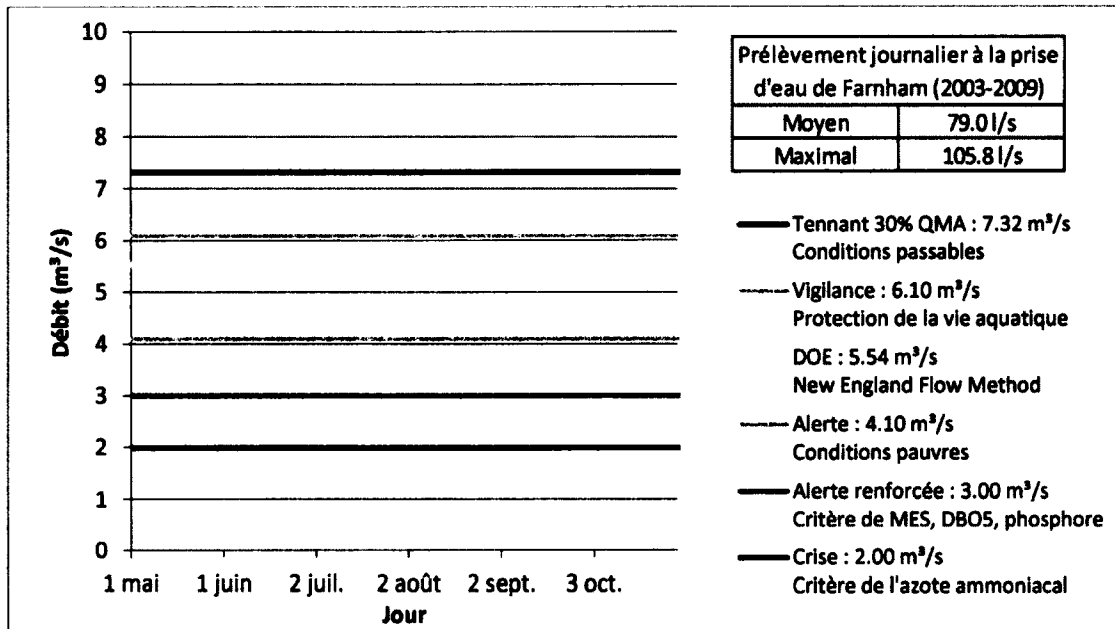


Figure B.1 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030302

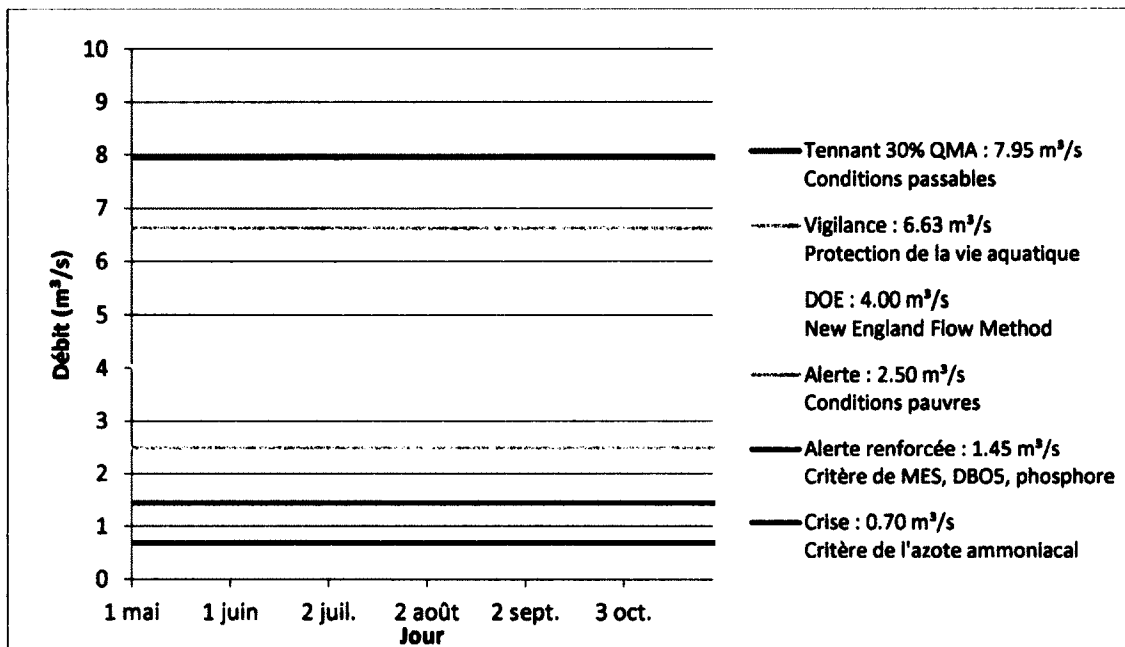


Figure B.2 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030304

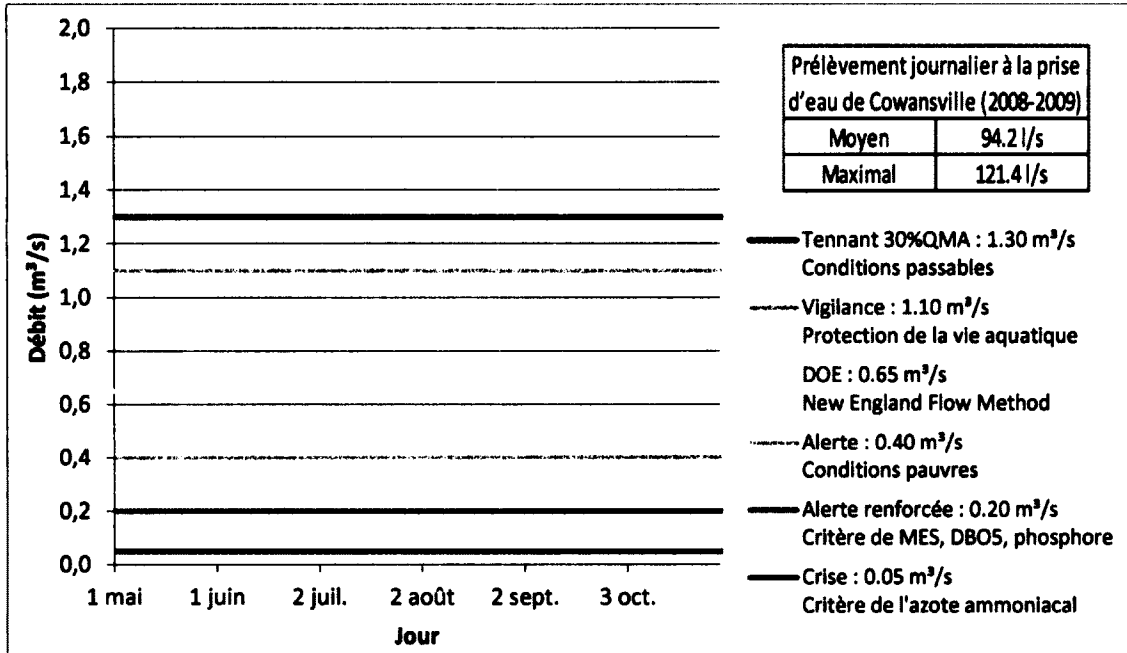


Figure B.3 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314

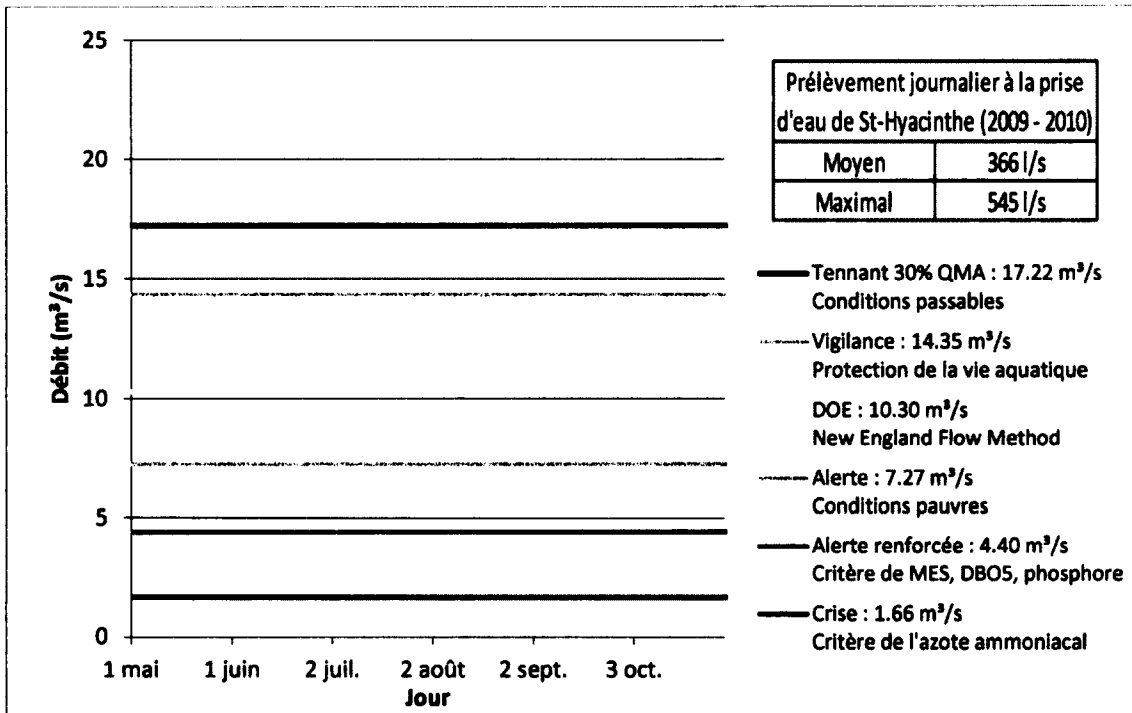


Figure B.4 Les niveaux d'alerte proposés aux stations 030341 et 030345

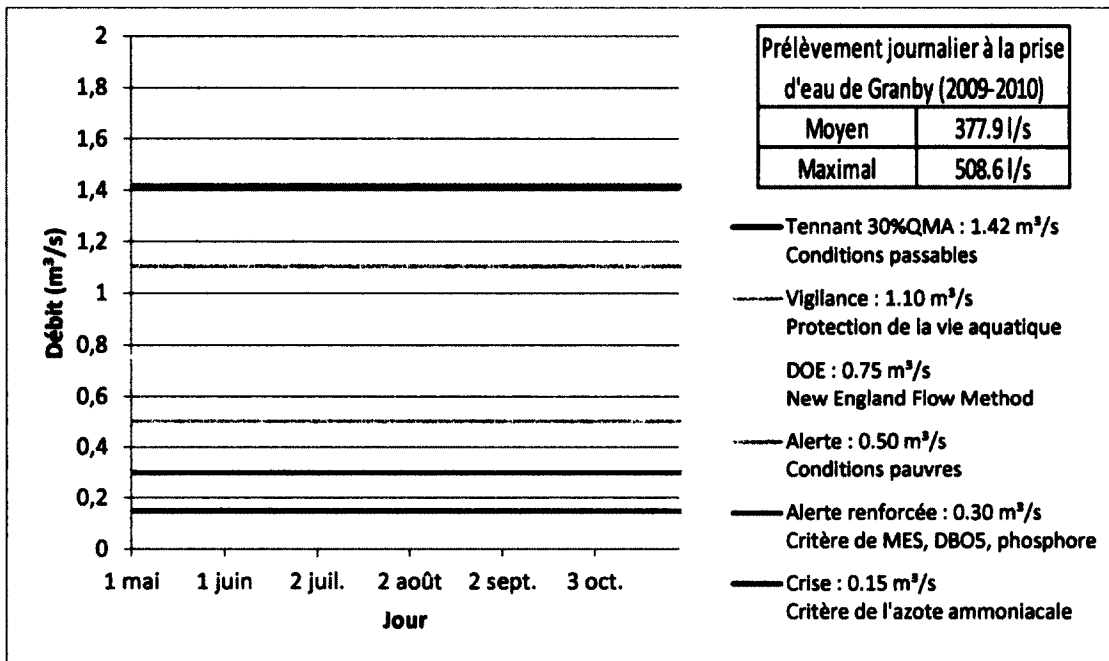


Figure B.5 Les niveaux d'alerte proposés à Granby (prise d'eau)

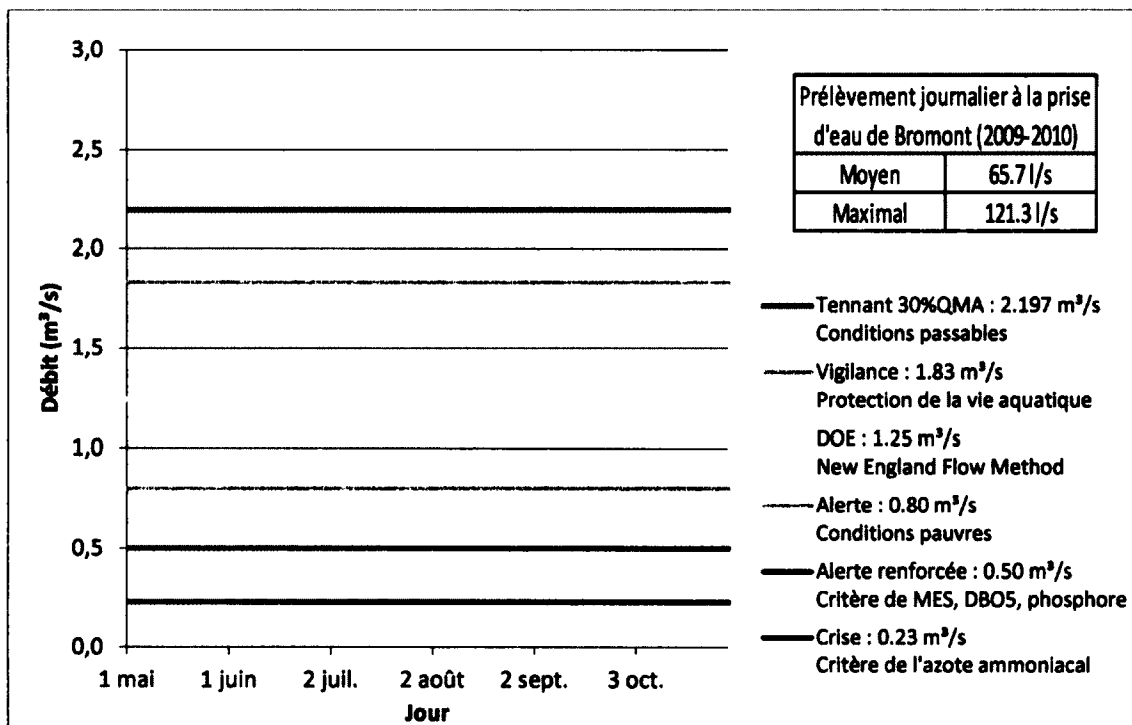


Figure B.6 Les niveaux d'alerte proposés à Bromont (prise d'eau)

ANNEXE C : LE NOMBRE DE JOURS SOUS CHACUN DES NIVEAUX D'ALERTE

Tableau C.1 Station 030302

Années	Nombre de jours où le débit est inférieur au niveau :				
	Vigilance (6,10 m ³ /s)	DOE (5,54 m ³ /s)	Alerte (4,10 m ³ /s)	Alerte renforcée (3,00 m ³ /s)	Crise (2,00 m ³ /s)
1966	128	121	75	51	29
1967	56	50	32	19	5
1968	133	125	90	53	0
1969	104	96	68	42	0
1970	68	54	8	0	0
1971	58	49	15	1	0
1972	50	42	35	32	0
1973	47	44	35	21	0
1974	26	17	3	0	0
1975	93	88	67	46	12
1976	13	7	0	0	0
1977	109	105	89	46	0
1978	68	57	7	0	0
1979	73	71	51	25	0
1980	48	42	18	2	0
1981	40	32	6	0	0
1982	83	63	31	0	0
1983	89	66	22	0	0
1984	64	46	23	6	0
1985	70	59	31	4	0
1986	16	13	2	0	0
1987	91	73	41	28	0
1988	102	91	60	33	2
1989	99	91	55	16	1
1990	44	35	11	0	0
1991	92	85	67	47	12
1992	82	72	52	30	0
1993	40	38	26	15	0
1994	54	38	8	0	0
1995	92	84	58	31	1
1996	68	66	36	2	0
1997	79	68	32	4	0

1998	89	80	43	11	0
1999	103	97	69	44	2
2000	103	89	42	12	0
2001	98	91	53	16	0
2002	57	48	38	22	0
2003	97	91	66	39	0
2004	50	39	1	0	0
2005	61	51	29	17	0
2006	30	26	2	0	0
2007	58	47	14	0	0
2008	46	34	2	0	0
2009	32	24	1	0	0
2010	40	31	4	0	0

Tableau C.2 Station 030314

Nombre de jours où le débit est inférieur au niveau :					
Années	Vigilance (1,10 m³/s)	DOE (0,65 m³/s)	Alerte (0,40 m³/s)	Alerte renforcée (0,20 m³/s)	Crise (0,05 m³/s)
1979	90	57	36	8	0
1980	98	76	33	6	0
1981	69	42	23	2	0
1982	124	61	33	9	0
1983	124	96	68	19	0
1984	98	59	23	0	0
1985	82	41	25	0	0
1986	51	23	6	0	0
1987	118	88	50	31	0
1988	117	86	69	38	6
1989	117	95	67	23	3
1990	74	48	28	0	0
1991	123	101	86	32	0
1992	85	52	21	0	0
1993	63	35	7	0	0
1994	111	73	12	0	0
1995	109	91	76	48	15
1996	88	60	48	16	0
1997	80	37	8	0	0
1998	123	85	39	4	0
1999	106	89	72	48	4
2000	123	77	31	3	0
2001	121	96	74	53	18
2002	65	48	30	19	5
2003	102	74	58	18	0
2004	33	9	0	0	0
2005	63	36	26	12	0
2006	39	3	0	0	0
2007	59	15	1	0	0
2008	44	9	0	0	0
2009	50	33	17	0	0
2010	52	19	5	0	0

Tableau C.3 Stations 030341 et 030345

Nombre de jours où le débit est inférieur au niveau :					
Années	Vigilance (14,35 m³/s)	DOE (10,30 m³/s)	Alerte (7,27 m³/s)	Alerte renforcée (4,40 m³/s)	Crise (1,66 m³/s)
1984	92	36	0	0	0
1985	89	52	13	0	0
1986	32	12	3	0	0
1987	119	95	65	36	8
1988	108	94	71	43	6
1989	125	115	106	63	0
1990	62	43	15	0	0
1991	100	91	79	60	0
1992	81	64	41	16	0
1993	67	58	42	13	0
2001	108	79	54	20	0
2002	89	70	47	32	6
2003	87	70	55	23	1
2004	63	43	20	0	0
2005	46	34	25	12	0
2006	43	18	3	0	0
2007	70	39	15	1	0
2008	37	12	2	0	0
2009	51	29	21	5	0
2010	54	43	21	3	0

Tableau C.4 Prise d'eau de Bromont

Nombre de jours où le débit est inférieur au niveau :					
Années	Vigilance (1,83 m³/s)	DOE (1,25 m³/s)	Alerte (0,80 m³/s)	Alerte renforcée (0,50 m³/s)	Crise (0,23 m³/s)
2006	31	14	7	2	0
2007	50	37	19	4	0
2008	45	26	10	0	0
2009	45	20	7	2	0
2010	38	16	0	0	0

Tableau C.5 Prise d'eau de Granby

Années	Nombre de jours où le débit est inférieur au niveau :				
	Vigilance (1,10 m³/s)	DOE (0,50 m³/s)	Alerte (0,30 m³/s)	Alerte renforcée (0,20 m³/s)	Crise (0,10 m³/s)
1979	4	0	0	0	0
1980	1	0	0	0	0
1981	0	0	0	0	0
1982	21	8	0	0	0
1983	15	1	0	0	0
1984	0	0	0	0	0
1985	2	0	0	0	0
1986	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	0	0
1988	0	0	0	0	0
1989	6	0	0	0	0
1990	1	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0
1993	0	0	0	0	0
1994	10	0	0	0	0
1995	0	0	0	0	0
1996	3	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0
1998	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0
2000	15	3	0	0	0
2001	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0
2003	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	0

ANNEXE D : LES MESURES DE RESTRICTION PROPOSÉES POUR CHACUN DES NIVEAUX D'ALERTE

Tableau D.1 Mesures pour l'usage domestique privé

DOMESTIQUE PRIVÉ	Sensibilisation (communiqué)				
Lavage des voitures (sauf dans les stations munies d'un système de recyclage)	Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit	Interdit
Arrosage des pelouses	Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit	Interdit
Arrosage des potagers	Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit	Interdit
Remplissage des piscines	Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit	Interdit
Remplissage des plans d'eau	Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit	Interdit
Nettoyage (à l'eau) des entrées privées	Interdit	Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Nettoyage des façades et terrasses	Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit	Interdit	Interdit
*** Les mesures de restriction ne sont pas applicables si l'eau provient de réserves pluviales (barils d'eau de pluie)					

Tableau D.2 Mesures pour l'usage domestique collectif

DOMESTIQUE COLLECTIVE				
	Sensibilisation (communiqué)			
Arrosage des espaces verts publics et privée	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit
Arrosage des espaces sportifs	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit
Arrosage des terrains de golfs	Interdit de 8h à 20h	Interdit (sauf pour les départs et les greens qui sont permis de 20h à 8h)	Interdit (sauf pour les greens qui sont permis de 20h à 8h)	Interdit
Alimentation des fontaines publiques (en circuit ouvert)	Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Lavage des rues et des trottoirs	Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit	Interdit
Rinçage du réseau d'aqueduc	Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Remplissage des piscines publiques	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit

Tableau D.3 Mesures pour l'usage agricole

AGRICOLE	Sensibilisation (communiqué)			
Contrôle	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement
Grandes cultures :				
- Prélèvement dans les cours d'eau et dans leurs nappes d'accompagnement	Mise en place de tours d'eau (1 journée sur 2)	Mise en place de tours d'eau (1 journée sur 2) et interdiction de 8h à 20h	Mise en place de tours d'eau (1 journée sur 3) et interdiction de 8h à 20h	Interdit
- Prélèvement dans les nappes souterraines	Limitation de 15 %	Limitation de 30 %	Limitation de 50 %	Interdit
Irrigation par submersion	Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Arrosage des cultures légumières et maraîchères en plein champ			Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h
Arrosage des cultures sous serres			Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h
Arrosage des cultures spécialisées			Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h
Bassinage des semis			Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h

Tableau D.4 Mesures pour l'usage industriel

INDUSTRIEL				
Sensibilisation (communiqué)				
Contrôle	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement
Limitation	Limitation de la consommation au strict minimum	Limitation de 10 % au compteur	Limitation de 20 % au compteur	Limitation de 30 % au compteur

Tableau D.5 Mesures pour d'autres usages

AUTRES				
Stations d'épuration	Surveillance accrue des rejets	Surveillance accrue des rejets	Certains rejets pourront être décalés jusqu'au retour d'un débit plus élevé	Certains rejets pourront être décalés jusqu'au retour d'un débit plus élevé
Activités récréatives	Inciter les acteurs à avoir des pratiques respectueuses vis à vis du milieu aquatique particulièrement vulnérable.		Interdiction : Parcourir le lit des cours d'eau à pied ou en véhicule à moteur	Interdiction : Parcourir le lit des cours d'eau à pied ou en véhicule à moteur
Protection contre les risques d'incendie			Interdiction de mises à feu d'herbes, de broussailles, de talus, d'ordures, etc.	Interdiction de mises à feu d'herbes, de broussailles, de talus, d'ordures, etc.

ANNEXE E : LES DONNÉES DE PRODUCTION DES PRISES D'EAU MUNICIPALES

Tableau E.1 Production des prises d'eau

Municipalité	Volume prélevé annuellement (m³)	Production moyenne journalière (l/s)	Production maximale journalière (l/s)
Bromont	2 071 915	65,7	121,3
Cowansville	2 969 430	94,2	121,4
Farnham	2 492 268	79,0	105,8
Granby	12 524 910	377,9	508,6
St-Hyacinthe	10 682 094	366,0	545,0

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abi-Zeid, I. et Bobée, B. (1999). *The stochastic modeling of low-flows: A literature review*. Revue des Sciences de l'Eau, volume 12, numéro 3, p. 459-484.
- Anctil, F., Larouche, W. et Hoang, V. D. (2000). *Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec*. Water Quality Research Journal of Canada, volume 35, numéro 1, p. 125-146.
- Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V. D. et Leclerc, M. (1997). *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec* (Rapport annuel 1996-1997). INRS-Eau, Québec, 136 p.
- Bendat, J.S. et Piersol, A.G. (1986). *Random data : Analysis and measurement procedures*. 2nd edition, John Wiley, New York, 566 p.
- Bérubé, J. (2007). *Évaluation d'un indice de pression sur les approvisionnements municipaux en eau potable au Québec à l'aide d'une méthode de régionalisation des débits d'étiage*. Maître ès sciences, INRS-ETE, Québec, 100 p.
- Besré, F. (2010). *Modélisation des débits au Lac Brome phase 1 : Méthode des bassins voisins* (Rapport technique), Québec, Canada, 37 p.
- CAA-Québec (2012). *Utilisation de l'eau en été – Maison Écol'Eau*. Dans Habitation, Trucs et astuces. <http://www.caaquebec.com/Habitation/TrucsEtConseils/Trucs-Conseils.htm?lang=fr> (page consultée le 04/25 2012).
- Caissie, D., El-Jabi, N. et Bourgeois, G. (1998). *Instream flow evaluation by hydrologically-based and habitat preference (hydrobiological) techniques; Evaluation du débit réserve par méthodes hydrologiques et hydrobiologiques*. Revue des Sciences de l'Eau, volume 11, numéro 3, p. 347-363.
- Caissie, D., El-Jabi, N. et Hebert, C. (2007). *Comparison of hydrologically based instream flow methods using a resampling technique*. Canadian Journal of Civil Engineering, volume 34, numéro 1, p. 66-74.
- Caissie, D. et El-Jabi, N. (1995). *Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada*. Canadian journal of civil engineering, volume 22, numéro 2, p. 235-246.
- Cappus, P. (1960). *Étude des lois de l'écoulement - Application au calcul et à la prévision des débits*. La Houille Blanche, p. 493-520.

- Castany, G. (1965). *Exploitation des eaux souterraines et bilan hydrique dans les calcaires de Tunisie*. Symposium on Hydrology of Fractured Rocks, Yougoslavie, 10p.
- Centre d'Expertise Hydrique du Québec (2004). *Sommaire du plan de gestion des eaux retenues - Barrage Choinière*. Québec, 4 p.
- Cloutier, S., Gélinau, M., Guay, I. et Québec (2007). *Calcul et interprétation des objectifs environnementaux de rejet pour les contaminants du milieu aquatique*, 2e éd édition. Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs, Développement durable, environnement et parcs Québec, Québec.
- Cyr, J-F. (2012), *Impacts potentiels des changements climatiques sur les événements hydrologiques extrêmes : sévérité des étiages et risques de crues*. Colloque en agroclimatologie, Drummondville, mars 2012.
- Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec (1999). *Fiche technique 14 : Prise d'eau*, Québec.
- EPIDOR (2008). *Plan de gestion d'étiage du bassin Dordogne Vézère* (Études et rapports). Établissement Public Territorial de Bassin Dordogne, France, 56 p.
- EPIDOR (2010). *Observation des cours d'eau au cours de l'étiage 2010 - Semaine du 6 au 11 septembre*. BD Carthage - AEAG, France.
- EPIDOR (2011). *L'étiage - Éviter la pénurie*. Dans Bassin Bordogne - Information débits, <http://www.debits-dordogne.fr/index.php?cat=2&id=18> (page consultée le 10/02 2011).
- EPIDOR (2012). *Statuts d'EPIDOR*. France.
- Fortin, V., Ouarda, T. B. M. J., Rasmussen, P. F. et Bobée, B. (1997). *A review of streamflow forecasting methods*. Revue des Sciences de l'Eau, volume 10, numéro 4, p. 461-487.
- GALBRAITH, J.W. et ZINDE-WALSH, V. (2004). *Évaluation de critères d'information pour les modèles de séries chronologiques*. L'Actualité économique, Volume 80, numéro 2-3, juin-septembre 2004, p. 207-227
- Lang, C. et Gille, E. (2006). *Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage*. Norois, volume 201, p. 31-43.
- Lang, C., Gille, E., Francois, D. et Auer, J. (2006). *PRESAGES: A collection of tools for predicting low flows; Le dispositif PRESAGES: Un ensemble d'outils pour la prévision des étiages*. Dans IAHS Press, p. 145-150.

- Lebarbier, E., Mary-Huard, T. (2004). *Le critère BIC : fondements théoriques et interprétation* (Technical Report RR-5315). INRIA, France, 20 p.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Talbot, G., Rousseau, A. et Chaumont, D. (2008). *Approvisionnement en eau potable et santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulement pour le sud du Québec* (Rapport de recherche). INRS-Eau, Québec, 164 p.
- Ministère de l'environnement (1999). *Le bassin de la rivière Yamaska : l'état de l'écosystème aquatique – 1998*. Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, 6 sections.
- Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs Québec (1997). *Bassin versant de la rivière Yamaska*. Dans Gouvernement du Québec, Développement durable, Environnement et Parcs Québec. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/pratiques-agri/yamaska/index.htm (page consultée le 06/14 2011).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2006). *Guide de conception des installations de production d'eau potable*. Québec, 544 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2010). *Niveau d'eau et débits*. Dans Gouvernement du Québec, Centre d'Expertise Hydrique Québec. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm> (page consultée le 06/14 2011).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2002). *Portrait régional de l'eau - Montérégie*. Dans Gouvernement du Québec, Développement durable, Environnement et Parcs Québec. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region16/16-monteregie.htm> (page consultée le 03/15 2012).
- Nantel, È. (2006). *Élaboration d'une méthode d'estimation des vulnérabilités historiques des approvisionnements en eau potable au Québec*. Maître ès sciences, INRS-ETE, Québec, 134 p.
- OBV Yamaska (2010). *La Yamaska, c'est notre eau, c'est nous tous*. Dans Organisme de bassin versant de la Yamaska. <http://www.obv-yamaska.qc.ca> (page consultée le 03/15 2012).
- Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water (1997). *Wasteload allocation for ammonia-nitrogen toxicity*. Ohio.
- Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water (2008). *National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) Permit Program, Regarding an NPDES Permit To Discharge to Waters of the State of Ohio for MMK Americas*. Ohio.

- Petts, G. E., Bickerton, M. A., Crawford, C., Lerner, D. N. et Evans, D. (1999). *Flow management to sustain groundwater-dominated stream ecosystems*. Hydrological Processes, volume 13, numéro 3, p. 497-513.
- Pyrce, R. (2004). *Hydrological Low Flow Indices and their Uses* (WSC Report). Watershed Science Centre, Ontario, 33 p.
- Québec (2012). *Règlement sur les habitats fauniques - Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune*. Québec, Article 17
- Renaissance Lac Brome (2011). *La gestion du barrage Foster et la convention avec la ville de Bromont* (Note technique), Québec, Canada, 17 p.
- Réseau-Environnement (2012). Cette été, soyez bleu. Dans Programme d'économie d'eau potable, Trucs et astuces. <http://www.reseau-environnement.com/publications/PEEP/trucsetastuces.html> (page consultée le 04/25 2012).
- Rivera-Ramirez, H., Warner, G. S. et Scatena, F. N. (2002). *Prediction of master recession curves and baseflow recessions in the Luquillo mountains of Puerto Rico*. Journal of the American Water Resources Association, volume 38, numéro 3, p. 693-704.
- Russell, G.W. (1990). *Determination of instream flow needs at hydroelectric project in the Northeast*. Ecology and assessment of warmwater streams: workshop synopsis, U.S. Fish and Wildlife Service, Biological Report 90(5), p. 36-37
- SMEAG EPTB-Garonne (2011). *Prévision du jour*. Dans SMEAG EPTB-Garonne, Syndicat Mixte d'Étude et d'Aménagement de la Garonne. http://www.eptb-garonne.fr/partenaires/previsions_jour.php (page consultée le 10/29 2010).
- Štravs, L. et Brilly, M. (2007). *Development of a low-flow forecasting model using the M5 machine learning method*. Hydrological Sciences Journal, volume 52, numéro 3, p. 466-477.
- Tharme, R. E. (2003). *A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers*. River Research and Applications, volume 19, numéro 5-6, p. 397-441.
- Tison, G. (1960). *Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin*. Association International d'hydrologie Scientifique, volume 051, p. 229-243.
- United States Environmental Protection Agency (1995). *Water Quality Guidance for the Great Lakes System: Supplementary Information Document (SID)*. United States.

United States Environmental Protection Agency (Décembre 1999). *Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria for Ammonia Update*. Dans EPA, EPA United States Environmental Protection Agency. <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/aqlife/pollutants/ammonia/technical.cfm> (page consultée le 06/13 2011).