

ÉTUDE DE FAISABILITÉ POUR LE RÉEMPLOI DES FLUIDES DE COUPE
POUR L'USINAGE DE PIÈCES CHEZ VERBOM INC. À VALCOURT

Par
N'goran Sylvestre N'Guessan

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Marc-J. Olivier

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Octobre 2022

SOMMAIRE

Mots clés : matières résiduelles dangereuses, fluide de coupe, 3RV-E, réemploi, procédés de traitement, avantages et inconvénients, faisabilité, ultrafiltration, microfiltration, Verbom Inc.

La gestion des matières dangereuses résiduelles au Canada est régie par un cadre légal à trois niveaux d'intervenants : les municipalités, les provinces et le fédéral. Verbom Inc. emploie un mélange aqueux à base d'huile CIMPULSE 45 MP comme fluide de refroidissement des machines à commande numérique. L'utilisation de ces produits et la production de déchets liquides qui en découle soulèvent des défis sociaux, économiques et environnementaux importants. Elle produit ainsi annuellement près de 12 000 litres de déchets liquides.

L'objectif ultime de cette étude est d'évaluer la faisabilité du réemploi des fluides de coupe des machines à commande numérique de l'usine U1 de Verbom Inc. à Valcourt. Pour ce faire, le cadre général québécois est déterminé avant d'analyser les options de traitement existant pour le réemploi des fluides de coupe puis de spécifier le scénario qui sied au contexte spécifique de l'entreprise. Neuf procédés de traitement sont comparés à travers une analyse multicritère en lien avec les objectifs de ce travail; c'est-à-dire, qui préserve les caractéristiques de la solution traitée en respectant les exigences environnementales, économiques et sociales. Il s'agit des traitements physicochimique, biologique aérobie et anaérobie, thermique, membranaire, par coalescence et écrémage, magnétique et par centrifugation. Ainsi, quatre critères comportant 11 sous-critères sont identifiés à cette fin. Il s'agit de l'efficacité technique de la méthode de traitement, du volet social, de l'aspect économique et de l'environnement.

Les résultats de l'analyse montrent que le procédé membranaire par microfiltration ou ultrafiltration est le mieux adapté pour le traitement et le réemploi des fluides de coupes aqueux de type solution vraie ou fluide synthétique. Cette option répond en grande partie aux objectifs de cette étude, car sur le plan de l'efficacité technique, elle préserve les propriétés refroidissantes et lubrifiantes de la solution traitée puis assure une simplicité de manœuvre. Au niveau du respect des exigences de développement durable, elle émet peu de contaminants et de nuisances dans l'environnement, consomme moins d'énergie, assure une utilisation en toute sécurité et les couts d'investissements et d'exploitation sont modérés. Néanmoins, il est recommandé de procéder à quelques ajustements notamment par l'ajout d'additifs anticorrosifs, antibactériens et antimousses. Une étude plus poussée pourrait contribuer à mieux caractériser le perméat de microfiltration et ultrafiltration et déterminer avec exactitude la nature et les proportions des ajustements pour parfaire la réemployabilité de la solution traitée.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cet essai a été possible grâce à l'action bienveillante de certaines personnes à qui il importe d'adresser ici la reconnaissance et la gratitude.

D'abord, à mon directeur d'essai, monsieur Marc J. Olivier qui a spontanément et gentiment accepté de consacrer du temps et de l'énergie à ce travail. Il a marqué sa disponibilité, son aide, sa promptitude et la qualité de ses rétroactions constructives. Son expertise pointue en gestion des matières dangereuses résiduelles et sa maîtrise des fluides de coupe en particulier ont facilité la formulation et la compréhension du sujet et m'ont également aidée à cadrer mes idées et focaliser sur les objectifs établis.

Ensuite, à monsieur Jean Beauchesne, Coordonnateur amélioration continue et entretien à Verbom Inc. pour avoir exprimé le besoin de l'entreprise en matière réemploi des fluides de coupe au sein de l'unité U1 de Valcourt. Il n'a ménagé aucun effort pour répondre à toutes les sollicitations d'informations.

Enfin, à tout le personnel du Centre universitaire de formation en environnement et développement durable (CUFE) du campus de Longueuil pour le soutien administratif et le support offert à toutes les étapes de la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. COMPRÉHENSION DU SUJET	4
1.1 Mise en contexte	4
1.1.1 Matières résiduelles	4
1.1.2 Matières dangereuses résiduelles.....	5
1.1.3 Situation spécifique au site à l'étude	6
1.2 Description du problème	7
1.3 Objectifs de l'essai	8
1.3.1 Objectif principal	8
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	8
1.4 Limites et portée de l'essai	9
1.5 Démarche méthodologique	9
1.5.1 Recherche documentaire	9
1.5.2 Analyse et interprétation de l'information	10
1.5.3 Logigramme.....	10
2. ÉTAT DES LIEUX DE LA GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES DANGEREUSES	12
2.1 Caractérisation des matières dangereuses résiduelles	12
2.1.1 Classification.....	12
2.1.2 Identification des matières dangereuses résiduelles.....	16
2.2 Le cadre légal, règlementaire et normatif	19
2.2.1 Au Québec	19
2.2.2 Au Fédéral	26
2.2.3 Ailleurs au Canada	28
2.3 Portrait de la gestion des matières dangereuses	30
2.3.1 Gestion des MDR au Québec.....	31
2.3.2 Gestion des MDR à Verbom Inc.....	36
3. SPÉCIFICITÉ DES LIQUIDES DE REFROIDISSEMENT DES MACHINES	38
3.1 Utilisation des fluides de coupe.....	38
3.2 Classification des fluides de coupe	40
3.2.1 Huiles entières.....	41
3.2.2 Fluides aqueux.....	41

3.3 Composition chimique des fluides de coupe	42
3.3.1 Les composants principaux	42
3.3.2 Les additifs.....	43
3.4 Préparation du fluide de coupe aqueux	44
3.4.1 Stockage du concentré	44
3.4.2 Mise en émulsion	45
3.4.3 Préparation des installations avant utilisation du produit.....	45
3.4.4 Contrôle du fluide en service	46
3.5 Brouillards d’huile	47
3.6 Risques liés à l’utilisation des liquides de refroidissement des machines.....	47
3.6.1 Facteurs de dangerosité des fluides de coupe	48
3.6.2 Risques pour la santé	49
3.6.3 Risques biologiques	51
3.6.4 Risques environnementaux.....	52
3.7 Utilisation des liquides de refroidissement chez Verbom Inc.	54
3.7.1 Description de l’huile.....	54
3.7.2 Description des machines CNC.....	56
4. LES OPTIONS DE TRAITEMENT DES LIQUIDES DE REFROIDISSEMENT USAGÉS.....	59
4.1 Facteurs de contamination et de dégradation des fluides de coupe	60
4.1.1 La dégradation.....	61
4.1.2 La contamination.....	61
4.2 Les traitements physicochimiques	62
4.2.1 Traitement mécanique	63
4.2.2 Traitement physicochimique proprement dit.....	63
4.3 Les techniques biologiques.....	66
4.3.1 Contamination microbienne des fluides de coupe	67
4.3.2 Types de bactéries.....	68
4.3.3 Effets de la contamination microbienne	69
4.3.4 Procédés de traitements	70
4.4 Les procédés membranaires.....	72
4.4.1 Structure des membranes.....	74
4.4.2 Géométrie des systèmes membranaires.....	74

4.4.3 Description du processus de filtration par la membrane.....	76
4.4.4 Classification des membranes	78
4.4.5 Techniques de séparation membranaires.....	80
4.4.6 Efficacité des procédés membranaires	86
4.5 Les procédés par voie thermique	87
4.5.1 Échangeurs de chaleur	87
4.5.2 Stérilisation directe et indirecte.....	91
4.5.3 Autres modes de traitement thermique	92
4.6 Séparation magnétique des copeaux	93
4.6.1 Types de séparateurs magnétiques	93
4.6.2 Dispositifs aimantés pour fluides de coupe	94
4.7 Coalescence et écrémage des huiles	96
4.7.1 Coalescence.....	96
4.7.2 Écrémage	97
4.8 Centrifugation.....	100
5. ANALYSE DES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT ET CHOIX DE L’OPTION APPROPRIÉE.....	102
5.1 Définition et présentation de la méthode	102
5.1.1 L’aide à la décision.....	102
5.1.2 L’aide multicritère à la décision	104
5.2 Synthèse des différents scénarios de traitement.....	105
5.2.1 La méthode physicochimique.....	106
5.2.2 La technique biologique	108
5.2.3 La méthode thermique.....	111
5.2.4 Les techniques membranaires	111
5.2.5 Le procédé par coalescence et écrémage des huiles	114
5.2.6 Le traitement par centrifugation.....	115
5.2.7 Le traitement par séparation magnétique	116
5.3 Définition des critères et du barème d’évaluation.....	118
5.3.1 Critères d’efficacité technique	118
5.3.2 Critères de développement durable	119
5.3.3 Synthèse des critères et barèmes d’appréciation.....	124
5.4 Analyse des options de traitement.....	124

5.4.1 Description du processus de notation et grille de référence	124
5.4.2 Analyse du procédé physicochimique	125
5.4.3 Analyse des procédés biologiques	127
5.4.4 Analyse des procédés membranaires.....	129
5.4.5 Analyse du procédé thermique	131
5.4.6 Analyse du procédé par coalescence et écrémage des huiles	132
5.4.7 Analyse du traitement par centrifugation.....	134
5.4.8 Analyse du traitement par séparation magnétique	135
5.5 Résultats et prise de position	136
CONCLUSION	141
RÉFÉRENCES	145
ANNEXE 1 : FICHES TECHNIQUES DU CIMCOOL CIMPULSE 45MP.....	154
ANNEXE 2 : CATÉGORIES D’EMPLOI DES MATIÈRES DANGEREUSES	162
ANNEXE 3 : PRODUCTION DES MDR DE 2012 À 2018 PAR CATÉGORIE AU QUÉBEC	165
ANNEXE 4 : QUANTITÉS MOYENNES DE MDR TRAITÉES DE 2012 À 2018 AU QUÉBEC.....	168
ANNEXE 5 : SYNTHÈSE DES CRITÈRES D’ANALYSE ET DES BARÈMES D’APPRÉCIATION	171

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 2.1	Classification des matières dangereuses résiduelles selon leurs propriétés-----	13
Tableau 2.2	Les catégories d'usage des matières dangereuses-----	14
Tableau 2.3	Classes principales SYCLAUN-----	15
Tableau 2.4	Classes subsidiaires SYCLAUN-----	15
Tableau 2.5	Synthèse des incompatibilités entre produits-----	16
Tableau 2.6	Codification des matières dangereuses selon l'état physique-----	16
Tableau 2.7	Historique de la législation sur les matières dangereuses-----	20
Tableau 2.8	Principaux règlements et lois en application à la gestion des matières dangereuses résiduelles-----	22
Tableau 2.9	Synthèse du cadre normatif et réglementaire des provinces et territoires du Canada-----	29
Tableau 2.10	Bilan quantitatif des matières dangereuses résiduelles par secteur-----	32
Tableau 3.1	Additifs pour les huiles entières et huiles solubles-----	44
Tableau 3.2	Les affections en fonction des métaux usinés-----	51
Tableau 3.3	Composition chimique du CIMPULSE 45MP-----	55
Tableau 3.4	Propriétés physicochimiques du CIMPULSE 45MP-----	55
Tableau 4.1	Types de traitement par nature des contaminants-----	60
Tableau 4.2	Avantages et inconvénients des matériaux des membranes-----	80
Tableau 4.3	Récapitulatif des forces motrices et répartition des substances en fonction du type de filtration-----	81
Tableau 4.4	Matériaux nanomembranaires et gammes d'utilisation en pH et température----	83
Tableau 4.5	Types de séparateurs magnétiques-----	94
Tableau 4.6	Classification des techniques de déshuilage selon l'efficacité-----	96
Tableau 4.7	Tension superficielle de certains liquides-----	97
Tableau 5.1	Caractéristiques des approches d'aide à la décision-----	103
Tableau 5.2	Avantages et inconvénients des traitements primaires-----	106
Tableau 5.3	Avantages et inconvénients du traitement physicochimique-----	107
Tableau 5.4	Comparaison entre les procédés aérobie et anaérobie en fonction des critères--	108
Tableau 5.5	Avantages et inconvénients des traitements aérobies et anaérobies-----	109
Tableau 5.6	Couts de quelques constructions de biofiltration-----	110
Tableau 5.7	Avantages et inconvénients du traitement thermique-----	111
Tableau 5.8	Distinction entre les procédés membranaires-----	112

Tableau 5.9	Avantages et inconvénients des techniques membranaires-----	112
Tableau 5.10	Avantages et inconvénients du procédé par coalescence et écrémage-----	114
Tableau 5.11	Avantages et inconvénients du procédé par centrifugation-----	116
Tableau 5.12	Avantages et inconvénients de la séparation magnétique-----	117
Tableau 5.13	Sous-critères techniques et barème d'évaluation-----	119
Tableau 5.14	Critères environnementaux et barèmes-----	121
Tableau 5.15	Résumé des critères économiques-----	123
Tableau 5.16	Sous-critères sociaux et barème de mesure-----	124
Tableau 5.17	Grille de référence de la notation-----	125
Tableau 5.18	Matrice de notation de la méthode physicochimique-----	127
Tableau 5.19	Matrice de notation des méthodes biologiques-----	129
Tableau 5.20	Application des techniques membranaires par niveau de traitement-----	129
Tableau 5.21	Synthèse de la notation des procédés membranaires-----	131
Tableau 5.22	Notation du procédé par voie thermique-----	132
Tableau 5.23	Matrice de notation du procédé par coalescence et écrémage des huiles-----	133
Tableau 5.24	Matrice de notation du procédé par centrifugation-----	135
Tableau 5.25	Matrice de notation du procédé de séparation magnétique-----	136
Tableau 5.26	Synthèse des résultats de processus de notation des options de traitement-----	138
Tableau 5.27	Classement des options de traitement en fonction des notes cumulées-----	139
Figure 1.1	Logigramme de la démarche méthodologique-----	11
Figure 2.1	Processus d'identification d'une matière dangereuse résiduelle-----	18
Figure 2.2	Suivi des MDR de la production à la gestion-----	33
Figure 2.3	Hiérarchisation des 3RV-E-----	34
Figure 2.4	Schéma des options de gestion d'une matière dangereuse résiduelle-----	35
Figure 2.5	Récipient de préparation du mélange aqueux-----	36
Figure 2.6	Dispositif d'aspiration du fluide de coupe usé de l'intérieur des CNC-----	37
Figure 2.7	Contenant de stockage du fluide de coupe usagé-----	37
Figure 3.1	Schématisation du processus d'usinage-----	38
Figure 3.2	Les aspects environnementaux causés par l'usinage des pièces-----	53
Figure 3.3	Illustration des équipements d'une CNC simplifiée avec les axes-----	57
Figure 4.1	Comportement de l'oxydation au cours du temps d'utilisation-----	61
Figure 4.2	Schéma du traitement par coagulation/floculation-----	64

Figure 4.3	Diagramme de solubilité de l'hydroxyde d'aluminium-----	64
Figure 4.4	Schéma du processus de traitement physicochimique-----	66
Figure 4.5	Processus de biodégradation de la matière organique-----	69
Figure 4.6	Diagramme du procédé de traitement par champignon filamenteux-----	72
Figure 4.7	Techniques membranaires en fonction de la taille des particules-----	73
Figure 4.8	Schéma de système à membrane tubulaire-----	75
Figure 4.9	Représentation schématique d'un module membranaire spiralé-----	75
Figure 4.10	Système membranaire à feuilles plates-----	76
Figure 4.11	Principe de fonctionnement du procédé membranaire-----	76
Figure 4.12	Modes de fonctionnement des systèmes membranaires-----	77
Figure 4.13	Fonctionnement de la filtration tangentielle-----	78
Figure 4.14	Classification des membranes synthétiques-----	79
Figure 4.15	Principe de l'osmose inverse-----	82
Figure 4.16	Fonctionnement du système de membrane d'ultrafiltration-----	85
Figure 4.17	Efficacité comparée des différents types de membranes-----	86
Figure 4.18	Cycles de chauffage et refroidissement du traitement thermique-----	87
Figure 4.19	Schéma d'un échangeur de chaleur à plaques-----	88
Figure 4.20	Schéma d'un échangeur de chaleur tubulaire-----	89
Figure 4.21	Schéma d'un échangeur de chaleur à surface raclée-----	90
Figure 4.22	Schéma d'un séparateur à disque -----	95
Figure 4.23	Écrémeur à disque-----	98
Figure 4.24	Écrémeur à tambour-----	99
Figure 4.25	Écrémeur à seuil-----	99
Figure 4.26	Schéma de fonctionnement du dispositif d'écémage et de coalescence-----	100
Figure 4.27	Schéma de la centrifugation-----	101
Figure 5.1	Les étapes du processus de prise de décision-----	105
Figure 5.2	Barème d'évaluation de l'investissement initial-----	122
Figure 5.3	Barème d'évaluation des charges d'exploitation-----	122
Figure 5.4	Présentation graphique des résultats du processus de notation-----	137

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

3RV-E	Réduction, réemploi, recyclage, valorisation, élimination
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFSSET	Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
APOH	Acétogène producteur obligatoire d'hydrogène
ASFETM	Association sectorielle fabrication d'équipement de transport et de machines
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
BPC	Biphényles polychlorés
CCHST	Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail
CNC	Machine-outil à commande numérique
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CRD	Construction-rénovation-démolition
CUFE	Centre universitaire de formation en environnement
dyn/cm	dyn par centimètre
GES	Gaz à effet de serre
GFGP	Groupe français de génie de procédés
H₂S	Sulfure d'hydrogène
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCN	Cyanure d'hydrogène
ICI	Industries, commerces et institutions
INRS	Institut national de la recherche scientifique
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
kDa	kilodalton
LCPE	Loi canadienne sur la protection de l'environnement
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
LRC	Lois refondues du Canada
LSST	Loi sur la santé et la sécurité du travail
MDR	Matières dangereuses résiduelles
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MES	Matières en suspension
MF	Microfiltration

mg/kg	milligramme par kilogramme (ppm)
mg/m³	milligramme par mètre cube (ppb)
mm/an	millimètre par an
MRC	Municipalité régionale de comté
NDELA	N-nitrosodiéthanolamine
NF	Nanofiltration
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
nm	nanomètre
OI	Osmose inverse
PP	Polypropylène
PPSRTC	Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PVC	Polyvinyl chloride (Polychlorure de vinyle en français)
PVDF	Fluorure de polyvinylidène
UV	Rayon ultraviolet
REAFIE	Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement
REIDDMRD	Règlement sur l'exportation et l'importation de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses
RLRQ	Recueil des lois et des règlements du Québec
RMD	Règlement sur les matières dangereuses
RMT	Règlement sur les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
RTMD	Règlement sur le transport des matières dangereuses
SACO	Substances appauvrissant la couche d'ozone
SIMDUT	Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail
SYCLAUN	Système de classification uniformisé
TH	Température
TMP	Triméthylphénol
tr/min	tour par minute
U1	Unité industrielle 1 Valcourt
U2	Unité industrielle 2 Sherbrooke
U3	Unité industrielle 3 Sherbrooke

UF	Ultrafiltration
UTTAM	Union des travailleuses et travailleurs accidentés ou malades
µg/kg	microgramme par kilogramme (ppb)

INTRODUCTION

La gestion des matières résiduelles en général et des déchets dangereux résiduels en particulier est un défi aussi bien mondial, régional que local. En effet, les capacités de l'environnement à éliminer ces matières résiduelles sont de plus en plus limitées. La prise en considération des principes du développement durable dans les modes et stratégies de gestion est plus qu'opportune et indispensable, vu l'impact réel aux niveaux social, économique et environnemental (Thibodeau et Coll., 2011). Selon le principe des 3RV-E, la hiérarchie préconisée pour la gestion des matières résiduelles est la réduction à la source, le réemploi, le recyclage, la valorisation avant l'élimination (Olivier, 2010). Ce principe est certes connu pour la gestion des matières résiduelles d'origine domestique, mais peut aussi s'appliquer pour les matières dangereuses résiduelles (MDR) [Lussier, 2003], comme les fluides de coupe usagés, objet de cette étude.

Ces liquides sont largement employés par aspersion dans les opérations d'usinage de pièces qui consistent à mettre en contact de manière dynamique, une pièce usinée et un outil à travers une machine-outil. Ces actions produisent inévitablement une élévation de la température et l'usure de l'outil sous l'effet des frottements. Pour pallier ce phénomène, les industries de travail de métaux ont recours aux fluides de coupe qui agissent comme refroidissants des outils et des pièces, comme lubrifiants pour réduire les frottements, comme nettoyeurs des copeaux et impuretés et enfin comme protecteur contre la corrosion des pièces et de l'outil d'usinage. Cette activité génère ainsi, près de 600 000 m³ de fluides de coupe usagés par an dont la prise en charge et la gestion s'imposent aux parties intéressées. (Hamdache, 2012) En effet, au fil du temps d'utilisation, les fluides perdent leur efficacité et sont rejetés comme matières résiduelles dangereuses, puis remplacés par de nouvelles afin d'assurer la continuité de la production. Ces fluides résiduels dangereux sont chargés de particules fines, de copeaux, de résidus métalliques et de substances chimiques néoformées comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) rendant la solution plus toxique (Union des travailleuses et des travailleurs accidentés ou malades [UTTAM], 2016).

Spécifiquement à l'unité U1 Verbom Inc. À Valcourt, site de cette étude, l'utilisation de ces fluides de coupe et la gestion des matières résiduelles qui en découlent soulèvent plusieurs enjeux d'ordre environnemental, économique et social. D'abord, lors de l'application des fluides de coupe, des aérosols qui contiennent des composés chimiques ainsi que des contaminants biologiques tels que des cellules, des bactéries et des moisissures peuvent être générés et émis dans l'air (Duchaine et Coll., 2003). De plus, la manipulation de ce produit peut occasionner des contacts cutanés. L'exposition des travailleurs à ces fluides de coupe les expose à plusieurs risques de santé et de sécurité, à savoir des affections cutanées, des affections respiratoires, des cancers, des risques biologiques ou des incendies provoqués par le dépôt de brouillard d'huile sur les installations (Plymovent, 2022). Ensuite, l'accroissement continue des

dépenses d'achat pour la composition de nouveaux fluides de coupe d'une part, et les coûts de disposition et de gestion des fluides résiduels d'autre part constituent des défis la maîtrise budgétaire. Enfin, toutes les étapes de la gestion des fluides usés incluant leur stockage dans des contenants à l'intérieur du site de l'usine, leur manutention des caques et leur transfert par pompage à l'extérieur comportent des risques pour l'environnement. Il peut subvenir des rejets accidentels pouvant contaminer le sol jusqu'à la nappe souterraine. Dans ce contexte, le traitement et le réemploi de cette huile de coupe usagée s'avèrent être la solution adéquate pour réduire le volume de fluide utilisé et de liquide résiduel produit. Par conséquent, ils entraîneront la baisse des pressions budgétaires sur l'entreprise, des menaces pour la santé et la sécurité des travailleurs et des risques pour l'environnement. Pour ce faire, plusieurs techniques de traitement sont appliquées dont les procédés physicochimiques, biologiques, thermiques et membranaires, par coalescence et écrémage, magnétique et par centrifugation.

Le but essentiel de cette étude est d'évaluer la possibilité du réemploi des fluides de coupe dans les machines à commande numérique (CNC) de l'usine U1 de Verbom Inc. située à Valcourt au Québec. L'atteinte de cet objectif passe nécessairement par la détermination du cadre réglementaire canadien et québécois de la gestion des liquides de refroidissement, ensuite par l'analyse des voies de traitement existant en vue du réemploi de ces fluides et enfin par la sélection de l'option de traitement la mieux adaptée au contexte de l'entreprise pour assurer leur réemploi dans les opérations d'usinage. Afin d'assurer la crédibilité de la démarche, des sources d'information variées et diversifiées sont consultées. Cette collecte d'informations permet de documenter et étayer les idées et notions en lien avec la problématique du traitement et du réemploi des fluides de coupe dans l'usinage des pièces. Ces sources sont majoritairement secondaires à travers les rapports d'études antérieures menées sur le sujet et éventuellement primaires, c'est-à-dire fournies par les ressources au sein de l'entreprise. En outre, l'analyse critique et actuelle est conduite en considérant la validité, la qualité et la diversification des sources utilisées.

Dans une démarche logique, l'essai se subdivise en cinq chapitres avec chacun, des sous-sections permettant une meilleure compréhension de la partie traitée. Ainsi, le chapitre 1 explicite le contexte de l'étude et vulgarise la problématique du sujet. Il définit également les objectifs du travail tout en précisant sa portée et ses limites puis décrit la démarche méthodologique nécessaire par l'atteinte des objectifs établis. Le chapitre 2 fait l'état des lieux de la gestion des matières dangereuses résiduelles au Québec. Il permet donc de mieux identifier et classer ces matières spécifiques, établir le cadre légal et réglementaire de leur prise en charge, puis il pose le portrait actuel de la gestion des MDR au niveau de la province et plus spécifiquement au sein de l'entreprise cible. Le chapitre 3 fait ressortir les spécificités des

fluides de coupes à travers leur classification, composition chimique, préparation ainsi que les risques associés à leur utilisation; à savoir les impacts sur la santé des travailleurs et sur l'environnement. Il rend compte en outre des caractéristiques de l'huile CIMPULSE 45 MP utilisée dans l'environnement de Verbom Inc. Le chapitre 4 s'attarde sur les différents procédés de traitement applicable aux fluides de coupe résiduels. Ainsi, il décrit les techniques physicochimiques, les traitements biologiques aérobie et anaérobie, la voie thermique, le système par coalescence et écrémage, la séparation magnétique, la technique par centrifugation et les procédés membranaires, qui se distinguent en microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. Enfin, le chapitre 5 expose l'analyse multicritère des différents procédés et conduit au choix de l'option de traitement appropriée. Il fait ressortir les avantages et inconvénients des différents modes de traitements, dévoile les critères adoptés avant de procéder à l'analyse minutieuse des six options de traitements décrites et rapporter les résultats qui en découlent.

1. COMPRÉHENSION DU SUJET

1.1 Mise en contexte

Le Québec s'est engagé dans une approche de développement durable qui encourage les initiatives en faveur d'une économie verte respectueuse de l'environnement (Bouchra, 2013). Les entreprises jouent un rôle important dans cette approche du fait de l'impact de leurs activités sur l'environnement par la production massive de matières résiduelles. De plus, certains types d'entreprises contribuent à générer des matières dangereuses résiduelles par les procédés de production et les intrants utilisés (Alguima, 2014).

1.1.1 Matières résiduelles

Au Canada, la gestion des matières résiduelles implique trois niveaux d'intervenants politiques. Les municipalités pilotent le déploiement des programmes résidentiels de collecte, de recyclage et d'élimination sur leur territoire. Ensuite, les provinces et territoires s'occupent de l'élaboration des règlements, politiques et normes régissant les mouvements intraterritoriaux, le système d'autorisation ainsi que la préservation de la sécurité et la santé des personnes engagées dans la gestion des matières résiduelles. Enfin, le fédéral édicte les lois pour réguler les flux internationaux et interprovinciaux des matières dangereuses résiduelles. De cette configuration, il ressort que les provinces ont la responsabilité majeure dans la gestion des matières résiduelles au Canada. (Alguima, 2014)

Trois secteurs contribuent à la production de matières résiduelles. Le secteur résidentiel relève d'un régime obligatoire de gestion par les organismes municipaux, soit la municipalité, la municipalité régionale de comté ou un organisme de délégation. À l'opposé le secteur industrie-commerce-institution (ICI) relève d'une gestion privée mise en place individuellement par les organismes de l'ICI. Il en est de même dans le vaste secteur construction-rénovation-démolition (CRD) qui regroupe les grands tonnages du secteur routier et ceux du bâtiment.

L'expression « matière résiduelle » est attribuée à toute matière ou tout objet usé, périmé, usagé ou mis au rebut (Olivier, 2015). D'autres juridictions utilisent encore le terme générique « déchet », mais cette façon de faire est désuète au Québec. Elle est usitée pour les seuls déchets ultimes pour lesquels il n'existe pas de forme de mise en valeur possible. La loi sur la qualité de l'environnement quant à elle définit la matière résiduelle comme étant « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné que le détenteur destine à l'abandon. » Certes, cette définition met l'accent sur la fonction de la matière,

mais elle laisse entrevoir le potentiel de mise en valeur dans lequel la matière résiduelle pourrait devenir une ressource (Thibodeau et al., 2011). Le secteur industries, commerces et institutions représente 40 % des 13 millions de tonnes de matières produites chaque année au Québec avec un taux de récupération qui ne dépasse pas les 50 % (Bouchra, 2013).

Par ailleurs, la question de la gestion des matières résiduelles au Québec révèle des enjeux sociaux, économiques et environnementaux qui préoccupent l'ensemble des parties prenantes à ce secteur d'activité. L'optimisation et le succès du système dans son ensemble dépendent aussi bien de la participation des citoyens que des industries, commerces et institutions (RECYC-QUÉBEC, 2018).

Afin de rendre plus intégrée et efficace la gestion des matières résiduelles, le Québec a adopté des politiques successives en 1989, 1998 et 2011. Ces politiques encouragent la diminution significative des déchets ultimes en privilégiant le principe des 3RV, à savoir : réduire à la source, réemployer, recycler, et valoriser. De même, dans la perspective d'une meilleure maîtrise des enjeux liés à la gestion des matières résiduelles, le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) a lancé en mars 2021 une consultation publique afin d'établir un meilleur diagnostic de la situation actuelle. Les résultats de cette étude rendus publics en janvier 2022 prônent entre autres, l'adoption de l'économie circulaire comme modèle économique prioritaire et la hiérarchisation des 3RV-E dans la gestion des matières résiduelles au Québec. Ainsi, une priorité est d'abord donnée à la réduction à la source, ensuite au réemploi, au recyclage, à la valorisation et enfin à l'élimination (BAPE, 2022). L'élimination est considérée par de nombreux auteurs comme le dernier échelon de la gestion des matières résiduelles à cause des coûts importants qu'elle génère et surtout son impact négatif sur l'environnement. L'approche par réemploi, recyclage et valorisation s'avère judicieuse dans ce contexte (Olivier, 1999 et Gamache, 2002).

1.1.2 Matières dangereuses résiduelles

La terminologie de matière dangereuse résiduelle a connu des variations et évolutions dans le temps. Ainsi, les déchets ou les résidus industriels, les déchets spéciaux, les déchets dangereux ramènent aux matières dangereuses résiduelles (Dallaire N., 2019).

Selon l'article 1 de la Loi sur la qualité de l'environnement, une matière dangereuse est « *toute matière qui, en raison de ses propriétés, présente un danger pour la santé ou l'environnement et qui est, au sens des règlements pris en application de la présente loi, explosive, gazeuse, inflammable, toxique, radioactive, corrosive, comburante ou lixiviable, ainsi que toute matière ou objet assimilé à une matière dangereuse* ».

Les déchets dangereux proviennent des matières comportant un risque pour la santé humaine et pour l'environnement. Au Québec, plusieurs secteurs d'activité économique, notamment la production de biens et services, émettent des matières dangereuses résiduelles dans le cadre de leurs opérations et qui nécessitent d'être traitées (IRSST, 2005). Ces déchets peuvent émaner, entre autres, de résidus des opérations industrielles de transformation et de fabrication, du domaine médical, des pesticides, des huiles et graisses (Thibodeau M. et al, 2011).

Les fluides de refroidissement, aussi appelés fluides de coupe ou fluides d'usinage ou lubrifiants de coupe désignent une série d'huiles et d'autres liquides qui refroidissent et lubrifient les pièces durant les opérations de façonnage, de meulage et de polissage. L'application de ces fluides permet de réduire les effets du chauffage, de friction et de dégagement de fumée entre l'outil et la pièce usinée (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail [CCHST], 2019). Ils sont utilisés surtout dans la métallurgie, la construction de machines, la construction automobile et la fabrication de matériels électriques (Union des travailleuses et des travailleurs accidentés ou malades [UTTAM], 2016). Au cours de leur utilisation, ils se chargent en particules fines, copeaux et limailles métalliques ainsi qu'en composés chimiques néoformés tels que des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ces éléments ajoutés sont connus pour être toxiques.

D'après un rapport d'étude français de janvier 2012 (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail de France [ANSES], 2021), 220 400 salariés sont exposés aux huiles entières minérales, aux huiles synthétiques et aux fluides aqueux dans la « métallurgie et le travail des métaux », dont plus de 2 200 salariés à une intensité d'exposition très forte (Département des risques professionnels, 2019). En France, l'utilisation des fluides de coupe est encadrée par les dispositions réglementaires liées aux agents chimiques dangereux (Institut national de la recherche [INRS], 2020). Au Québec, la gestion des liquides résiduels issus de l'utilisation des fluides de coupe est guidée par le règlement Q-2, r. 32 sur les matières dangereuses (RMD) qui attribue de façon péremptoire le statut de matière dangereuse résiduelle (MDR) aux fluides de coupe usagés.

1.1.3 Situation spécifique au site à l'étude

Verbom Inc. est une entreprise québécoise fondée en 1978 et intervenant dans la transformation du métal en feuille. Elle offre ses services dans des domaines d'activité variés comme l'ingénierie, le conseil, l'outillage et la production, principalement dans les secteurs de l'automobile, de l'électroménager, des véhicules récréatifs et du transport en commun. Plus spécifiquement, elle développe l'expertise dans (Verbom, 2022) :

- la conception et fabrication d'outillage de presse pour les pièces structurales, les pièces d'aspect, les écrans thermiques et acoustiques;
- le traitement des matériaux exotiques tels que les aciers biphasés, les aciers inoxydables, les matériaux prépeints et les alliages d'aluminium;
- l'ingénierie en design de pièces appropriées aux métaux en feuille;
- les solutions innovantes techniquement aux couts et poids réduits;
- la soudure robotisée, l'emboutissage, la découpe au laser 3D, le collage par adhésif structural;
- le thermoformage de l'aluminium et du magnésium.

Au cours des dix dernières années, l'entreprise a été marquée par une importante croissance lui permettant d'ajouter deux nouvelles usines à Sherbrooke en plus de celle de Valcourt afin de mieux satisfaire sa clientèle au Canada, aux États-Unis et en Europe (Pro Gestion Estrie, 2019).

À l'unité U1 de VERBOM Inc. à Valcourt, le produit utilisé et dilué pour former les fluides de coupe est essentiellement le CIMPULSE 45 MP fournit par CIMCOOL. La fiche technique de ce produit est donnée en annexe 1. Chaque année, environ 3 000 litres de ces produits sont utilisés par les machines CNC et Grinder (meule) produisant ainsi près de 12 000 litres de déchets liquides (Verbom, 2021). De plus, une centaine de salariés est en contact quotidien avec ces liquides de refroidissement pour un temps d'exposition variant entre 8 et 10 heures.

1.2 Description du problème

L'utilisation de ces produits et la production de volumes considérables de déchets liquides posent des défis sociaux, économiques et environnementaux.

Au niveau social, les dangers liés à l'exposition aux fluides de coupe sont moins connus du corps médical en général. Cependant, les experts identifient trois types de risques pour la santé. Ces déchets contiennent des substances chimiques susceptibles de provoquer des affections cutanées, des problèmes respiratoires et des cancers pouvant être reconnus comme maladies professionnelles (UTTAM, 2016). Ils peuvent également exposer les travailleurs à des risques chimiques par inhalation ou par contact cutané, des risques biologiques à travers des contaminants biologiques, des espèces bactériennes ou fongiques pouvant se retrouver dans les fluides aqueux d'usinage. (Département des risques professionnels, 2019) De même, les dépôts de brouillard d'huile peuvent entraîner un risque d'incendie en plus de la prolifération des bactéries et des moisissures qui génère des problèmes d'hygiène (Plymovent, 2022). En 2000, la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) estimait qu'au Québec près de 8 000 travailleuses et travailleurs dans 860 entreprises y étaient possiblement

exposés. Aux États-Unis, 1,5 million de travailleuses et de travailleurs seraient dans la même situation (UTTAM, 2016).

Au niveau économique, l'analyse des dépenses consacrées à l'achat des produits refroidissant et à la gestion des liquides de coupe usés générés montre une croissance constante ces 5 dernières années, passant de 12 500 dollars en 2016 à 23 000 dollars en 2021 (Verbom, 2021). Cette situation pose un réel problème de maîtrise et contrôle de l'enveloppe budgétaire. Le défi est donc d'inverser la tendance actuelle des dépenses liées aux liquides de refroidissement au sein de l'unité U1 de Valcourt.

Au niveau environnemental, des brouillards fins, des aérosols ou des vapeurs peuvent émaner des opérations et contaminer l'air environnant. En outre, le stockage de ces liquides usagés dans des fûts à l'extérieur du site soulève un problème potentiel de contamination du sol avec la possibilité d'infiltration jusqu'à la nappe souterraine. De plus, le risque de rejets accidentel dans les égouts demeure vraisemblable.

Plusieurs techniques de traitement des rejets liquides industriels existent en France, au Royaume-Uni et en Suisse. Ils comprennent entre autres les techniques physicochimiques, biotechnologiques, électrolytiques, membranaires et les ultrasons (Groupe français de génie de procédés [GFGP] (1993)). Au niveau spécifique du recyclage des fluides de coupe, la documentation existante fournit peu d'informations sur sa mise en œuvre au Québec. Cependant, en France, plusieurs structures comme SIEBEC, SOFRAPER, ID System Fluid BDS et bien d'autres développent des technologies et procédés en usage. Face aux problèmes environnementaux, sociaux et économiques qui émergent de l'utilisation des fluides de coupe au sein de Verbom Inc. et de la pertinence du recyclage, une question émergente est l'identification des techniques de traitement les plus adaptées et performantes dans l'environnement de Verbom Inc. à Valcourt. En plus, quelle est la faisabilité technique et économique pratique de mise en œuvre en l'état actuel.

1.3 Objectifs de l'essai

1.3.1 Objectif principal

L'objectif général de cet essai est d'évaluer la faisabilité du réemploi des liquides de refroidissement des machines CNC de l'usine U1 de Verbom Inc. à Valcourt.

1.3.2 Objectifs spécifiques

L'atteinte de cet objectif nécessite la réalisation d'objectifs spécifiques. À savoir :

- déterminer le cadre général et réglementaire québécois de la gestion et du recyclage des liquides de refroidissement;
- analyser les options techniques de traitement existant pour le réemploi des liquides de refroidissement;
- spécifier les options qui s'inscrivent au contexte spécifique à l'entreprise Verbom Inc.;
- évaluer les exigences techniques de leur mise en œuvre ainsi que les coûts associés.

1.4 Limites et portée de l'essai

Cette étude est menée à l'échelle de l'entreprise Verbom Inc., principalement pour son unité U1 située au 5066 Route 222 à Valcourt. Elle concerne spécifiquement les machines à commande numérique (CNC) en usage au sein de cette unité de production. Les résultats sont applicables à ses deux sites U2 et U3 à Sherbrooke qui utilisent aussi ce type d'équipements.

1.5 Démarche méthodologique

Pour atteindre l'objectif de cette étude, une démarche rigoureuse est suivie. Ainsi, les résultats de la recherche documentaire de source primaire et secondaire, variée et crédible, menée en amont sont analysés à l'aide de l'outil d'examen des forces et faiblesses et d'analyse multicritère adapté au contexte de l'étude. Ces étapes conduisent à prendre une décision éclairée face à la problématique du réemploi des liquides de refroidissement des machines de Verbom Inc. avant de proposer des pistes appliquées qui favorisent l'atteinte des objectifs.

1.5.1 Recherche documentaire

La collecte d'informations menée et permet de définir et documenter les concepts généraux et spécifiques du réemploi des fluides de refroidissement pour l'usinage des pièces. Elle conduit à mieux cerner le cadre global et spécifique de la gestion et du traitement des liquides de coupe au Québec. Les sources de collecte des informations sont essentiellement secondaires et accessoirement primaires, issues de l'entreprise.

➤ Informations primaires

La recherche des informations primaires, dans le cadre de ce projet, se fait directement auprès du site U1 de l'entreprise Verbom Inc. à Valcourt. Elle consiste à recueillir l'information et les données auprès des acteurs et services intervenant dans l'utilisation et la gestion des liquides de refroidissement. Il s'agit des services en charge de l'amélioration continue et de la maintenance qui s'occupent du fonctionnement et des intrants pour les machines à commande numérique (CNC). Cette recherche d'informations s'étend, le cas échéant, à l'entreprise sous-traitante GFL responsable de la cueillette et de la gestion des liquides de refroidissement usés hors du site de Verbom Inc.

➤ Informations secondaires

La collecte d'informations secondaires a lieu à travers les rapports d'études et d'essais, les mémoires de thèse, la littérature, les articles scientifiques et tout document et données en lien avec la thématique traitée; à savoir les liquides de coupe résiduels.

1.5.2 Analyse et interprétation de l'information

Une étape importante du projet consiste d'abord à choisir l'outil d'analyse le mieux adapté à la problématique de l'étude. Ainsi la méthode d'analyse des forces et faiblesses combinée avec une analyse multicritère est retenue pour ce projet du fait de la nécessité de comparer plusieurs options en vue de choisir la meilleure. Elle permet ainsi, à partir des forces et faiblesses de chacune des options et des critères d'analyse identifiés, de sélectionner l'option la mieux adaptée pour le traitement et le réemploi des liquides de refroidissement usagés. Elle est adaptée parce qu'elle tient compte dans son élaboration, des paramètres axés sur l'extérieur et l'avenir en plus de ceux qui analysent le passé et le présent (ONU Femmes, 2012).

1.5.3 Logigramme

Le logigramme présente les hypothèses de façon simplifiée et graphique pour favoriser l'appropriation et la compréhension. La figure 1.1 ci-après donne une vue globale des grandes étapes de la démarche mise en œuvre pour compléter l'essai.

Problème : Quelles sont les techniques de traitement et de réemploi les plus adaptées et performantes des liquides de refroidissement des machines dans l'environnement de Verbom à Valcourt ?

Objectif principal : Étudier la faisabilité du réemploi des liquides de refroidissement des machines CNC de l'usine de Verbom à Valcourt

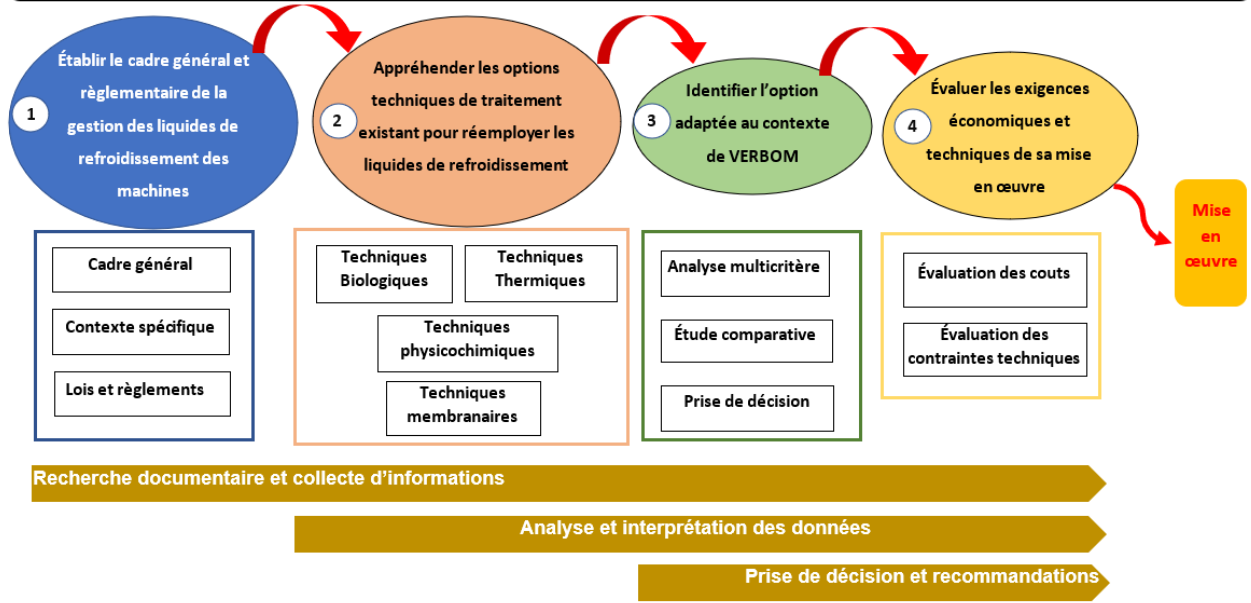


Figure 1.1 : Logigramme de la démarche méthodologique

2. ÉTAT DES LIEUX DE LA GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES DANGEREUSES

La compréhension et la définition d'une matière dangereuse présentent des nuances selon qu'elle est appréhendée sous l'angle de la loi fédérale ou celle des provinces. Ainsi, il n'existe pas de définition commune à l'échelle nationale. Par exemple, les contenants vides et les huiles usées sont pris en considération ou exclus des matières dangereuses résiduelles selon le palier fédéral, provincial ou municipal. Néanmoins, l'ensemble des définitions tiennent compte des propriétés physiques et chimiques de ces matières les rendant dangereuses. Ainsi, les matières dangereuses se définissent comme celles qui ne servent plus au but initialement destiné et qui exposent à un danger pour l'environnement ou pour la santé et la sécurité humaines. Ces dangers sont liés aux caractères réactifs, toxiques, corrosifs, combustibles, inflammables, comburants ou radioactifs des produits utilisés et imposent un mode de gestion spécifique et adapté. (Tremblay, 2015)

2.1 Caractérisation des matières dangereuses résiduelles

La caractérisation a pour but de garantir une gestion efficiente des matières dangereuses résiduelles au niveau de la manipulation, du transport, du stockage et de l'élimination (Ledoux et Roy, 1997) d'une part, puis de la collecte, du traitement et de la valorisation d'autre part (Hogland et Stennis, 2000).

2.1.1 Classification

Elle permet de classer les différentes matières dangereuses résiduelles selon leurs propriétés physicochimiques ou bien selon leur usage.

➤ Classification selon les propriétés physicochimiques

L'article 1 alinéa 9 de la Loi sur la qualité de l'environnement détaillé par l'article 3 du règlement sur les matières dangereuses spécifie les critères servant à caractériser et classer les matières dangereuses résiduelles à partir de leurs propriétés. Il stipule que : « [...] toute matière qui, en raison de ses propriétés, présente un danger pour la santé ou l'environnement et qui est au sens des règlements pris en application de la présente loi, explosive, gazeuse, inflammable, toxique, radioactive, corrosive, comburante ou lixiviable, ainsi que toute matière ou objet assimilé à une matière dangereuse. » (LQE, 2018) En outre, une classification est donnée par le SIMDUT pour mieux encadrer leur manipulation et emploi afin de garantir la santé et la sécurité des personnes travaillant dans cet environnement (Gamache, 2002). Le tableau 2.1 dessous fait la synthèse des classes de matières dangereuses résiduelles.

Tableau 2.1 : Classification des matières dangereuses résiduelles selon leurs propriétés (adapté de Dallaire, 2019)

Propriétés dangereuses	Définitions	Détails
Gaz sous pression	Gaz comprimés Gaz liquéfiés Gaz dissouts Gaz liquides réfrigérés	Les gaz comprimés, gaz liquéfiés et gaz dissouts sont dangereux à cause de la pression élevée
Matière explosive	Substance générée par une réaction chimique exothermique, auto entretenue et qui émet des gaz sous pression et à vitesse élevée Substance pyrotechnique fabriquée pour produire l'effet d'explosion	
Matières inflammables et combustibles	Produits dont le point éclair est inférieur ou égal à 61° C. Ils peuvent s'enflammer ou brûler facilement.	Gaz et liquides inflammables Gaz et liquides combustibles Solides inflammables Aérosols inflammables Matières réactives inflammables
Matière comburante	Matière qui entretient la combustion d'autres matières par libération d'oxygène ou autres. Matières oxydantes ou bien qui contiennent une substance organique avec la structure peroxyde O-O	Englobent les comburants, qui peuvent causer ou intensifier un incendie ou entraîner un incendie ou une explosion
Matière toxique	Matière qui produit par réaction, plus de 250 mg/kg de cyanure d'hydrogène (HCN) ou 500 mg/kg de sulfure d'hydrogène (H ₂ S). Matière qui contient plus de 5 µg/kg de polychlorodibenzofurane ou de polychlorodibenzodioxine	
Matière radioactive	Matière qui émet spontanément des rayonnements ionisants, dangereux pour la santé et la sécurité	
Matière corrosive	pH inférieur à 2 ou supérieur à 12,5 ou peut corroder un acier de type SAE 1020 à une vitesse de 6,25 mm/an à 55 °C ou peut provoquer des brûlures de la peau	
Matière lixiviable	Matière liquide contenant un contaminant de concentration supérieure à la limite définie dans le règlement sur les matières dangereuses résiduelles	

➤ Classification selon l'usage

La classification selon l'emploi quant à elle repose sur l'appellation générique qui donne à l'utilisateur des indications sur les aspects et propriétés du produit tant pour le transport, l'entreposage que la gestion courante. Elle tient compte de la compatibilité ou non entre les matières et matériaux. (Dallaire, 2019)

L'annexe 2 explicite l'ensemble des catégories. Néanmoins, le tableau 2.2 ci-dessous fournit une vue synthétique selon le RMD.

Tableau 2.2 : Les catégories d'usage des matières dangereuses (adapté de Dallaire, 2019)

Catégorie	Désignation
A	Huiles et graisses minérales ou synthétiques
B	Solides et boues organiques
C	Solvants organiques
D	Solutions organiques
E	Solides et boues inorganiques
F	Solutions aqueuses inorganiques
G	Matières dangereuses acides (pH < 2)
H	Matières dangereuses caustiques (pH > 12,5)
J	Matières et objets contenant des BPC ou contaminés par des BPC
K	Matières dangereuses provenant d'un laboratoire
L	Matières dangereuses contaminées
M	Autres matières dangereuses

➤ Classification uniformisée SYCLAUN

La classification uniformisée SYCLAUN mise en place au sein de l'université de Sherbrooke se base sur les propriétés physicochimiques des produits, mais a pour principe de restreindre les incompatibilités entre les produits (Gamache, 2002 et Université de Sherbrooke, 2012). Son objectif est d'assurer l'entreposage sécuritaire des produits chimiques utilisés au sein de l'université et dans ses laboratoires en particulier. Elle se fonde sur divers concepts dont les plus marquants sont les suivants (Université de Sherbrooke, 2012) :

- la séparation entre les contenants de substances acides et ceux des substances alcalines;
- la distinction entre les acides minéraux et les acides organiques, qui ont des propriétés inflammables ou combustibles également;

- les contenants de substances oxydantes sont séparés des contenants de substances réductrices et des matières inflammables;
- l'évaluation individuelle des produits hautement réactifs en considérant l'ensemble des propriétés du produit ainsi que des produits appartenant à plusieurs classes du fait de leurs propriétés;
- la précaution dans le traitement des produits incompatibles avec l'eau et/ou l'air [métaux alcalins (Li, Na, K), hydrure de lithium (LiH), de sodium (NaH) ou d'aluminium (LiAlH₄), organométalliques (butyllithium), carbure de calcium (CaC₂)];
- le traitement particulier pour tous les produits capables de former des peroxydes (les éthers et certains alcools);
- les produits appartenant à plusieurs classes du fait de leurs propriétés sont soumis à une évaluation individuelle selon leurs risques.

Le SYCLAUN distingue essentiellement deux classes. D'abord, les classes principales qui regroupent les produits réactifs, explosifs ou gazeux. Elles sont données dans le tableau 2.3 ci-après.

Tableau 2.3 : Classes principales SYCLAUN (adapté de Gamache, 2002)

Classes	Description
R	Produits réactifs
X	Produits explosifs
I	Produits gazeux

Ensuite, les classes subsidiaires sont regroupées dans le tableau 2.4 dessous.

Tableau 2.4 : Classes subsidiaires SYCLAUN (adapté de Gamache, 2002)

Classes	Description
A	Acides
B	Bases
C	Solides organiques
D	Liquides organiques
E	Oxydants
F	Réducteurs
S	Produits inorganiques

Chaque substance peut être identifiée suivant une des classes principales et secondaires. Ainsi, le tableau 2.5 ci-après résume les incompatibilités entre les produits de différentes classes. Il ressort que seuls les produits des classes C, D et S sont compatibles ensemble.

Tableau 2.5 : Synthèse des incompatibilités entre produits (adapté d'Université de Sherbrooke, 2012)

	A	B	C	D	E	F	S
A	Ok	No	No	No	No	No	No
B	No	Ok	No	No	No	No	No
C	No	No	Ok	Ok	No	No	Ok
D	No	No	Ok	Ok	No	No	Ok
E	No	No	No	No	Ok	No	No
F	No	No	No	No	No	Ok	No
S	No	No	Ok	Ok	No	No	Ok

Légende :

No	Produits incompatibles
Ok	Produits compatibles de même classe
Ok	Produits compatibles classes différentes

2.1.2 Identification des matières dangereuses résiduelles

L'identification d'une matière dangereuse est fournie par le code de sa catégorie présentée dans le tableau 2.2 dessus, accompagné des numéros de sa classe et de sa division, attribués en vertu du Règlement sur le transport des matières dangereuses ainsi que par le code indiquant son état physique tel que déterminé selon le tableau 2.6 suivant :

Tableau 2.6 : Codification des matières dangereuses selon l'état physique (tiré de MELCC, 2022)

Code	État physique
L	Liquide
S	Solide
P	Semi-solide (boue)
G	Gazeux

Par exemple, les huiles de coupe et huiles lubrifiantes usées seront identifiées selon une structure alpha numérique du type A01-0.0-L qui permet une désignation complète. Ici, la lettre A identifie la catégorie des huiles et graisses minérales, 01 spécifie la sous-catégorie des huiles usées, dont la concentration en BPC est inférieure à 3 mg/kg et L précise son état liquide.

De plus, déterminer si une matière est dangereuse nécessite le passage en revue des différents paramètres de définition arrêtés par la LQE, le règlement sur le transport des matières dangereuses et le SIMDUT. Une vue globale du processus d'identification est donnée par le diagramme illustré sur la figure 2.1 ci-après.

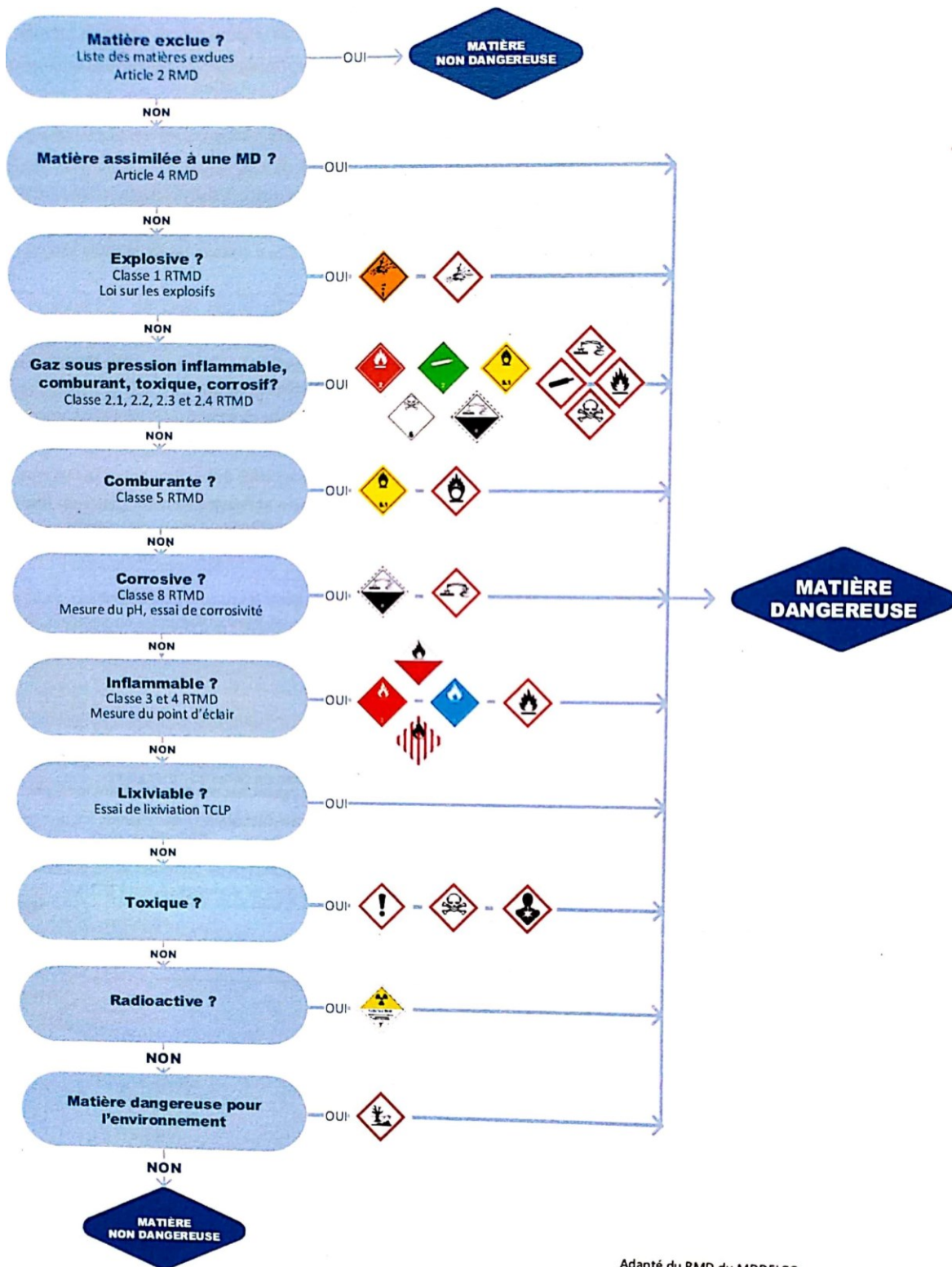


Figure 2.1 : Processus d'identification d'une matière dangereuse résiduelle (tiré de Dallaire, 2019)

2.2 Le cadre légal, règlementaire et normatif

Dans le but de préserver la santé de personnes et de l'environnement, un cadre légal et règlementaire est établi pour faciliter une meilleure gestion des déchets dangereux. Il s'agit de présenter dans cette section, l'encadrement juridique des matières dangereuses résiduelles au Québec, au niveau fédéral et dans les autres provinces du Canada ainsi qu'ailleurs dans le monde.

2.2.1 Au Québec

Au Québec, le dispositif légal et règlementaire permet d'organiser la production des matières dangereuses résiduelles ainsi que les installations servant à leur gestion et transport (Dallaire, 2012 et Environnement Canada, 2018). La Loi sur la qualité de l'environnement est le principal instrument qui encadre la gestion des matières résiduelles en général et les résidus dangereux en particulier (Gamache, 2002). Elle est appuyée par divers règlements, politiques et normes spécifiques à certaines matières et certains domaines. C'est un cadre juridique dynamique qui connaît de constantes mises à jour et amendements qui doivent être pris en considération pendant la gestion.

➤ Historique

Certains événements malheureux liés aux matières dangereuses résiduelles ont secoué le Québec vers la fin des années 1980. On pourrait citer l'incendie le 23 août 1988 d'un entrepôt contenant des barils contaminés par des BPC, la contamination au plomb à Saint-Jean-sur-Richelieu découverte le 24 août 1989, l'incendie de pneus à Saint-Amable le 16 mai 1990 (Lussier, 2003). Le BAPE met alors sur pied une commission d'enquête sur les déchets dangereux, aussi appelée commission Charbonneau, dont le rapport est publié en septembre 1990. Suivant les recommandations de cette commission, le règlement sur les déchets dangereux a été abrogé et remplacé par celui sur les matières dangereuses en vigueur depuis 1997. Le tableau 2.7 ci-après résume les évolutions règlementaires et législatives au cours des années.

Tableau 2.7 : Historique de la législation sur les matières dangereuses (adapté d’Hydro-Québec, 2013 et Dallaire, 2019)

Années	Législations
1970 à 1979	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1972 : Début de l’utilisation des certificats d’autorisation et des permis pour réguler la production et le stockage de matières résiduelles provenant des industries; ■ 1975 : Naissance du règlement sur la gestion des déchets liquides; ■ 1978 : Règlement sur les déchets solides; ■ Création du ministère de l’Environnement en 1979.
1980 à 1989	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1981 : Ébauche de la première politique québécoise de gestion des déchets industriels; ■ Les efforts de réglementation portent surtout sur les matières dangereuses résiduelles et la qualité des eaux; ■ Adoption de deux politiques consacrées aux neiges usées et les terrains contaminés par le gouvernement du Québec; ■ Prise de quatre règlements concernant la qualité et le traitement des eaux usées et potables ainsi que la gestion des matières dangereuses aussi connues (à l’époque) sous les appellations déchets liquides (1981) et déchets dangereux (1985); ■ Deux règlements fédéraux traitent plus spécifiquement des BPC en 1985; ■ Adoption du règlement sur les déchets dangereux; ■ 1988 : Constitution de la commission d’enquête sur les déchets dangereux au Québec par le BAPE.
1990 à 1999	<ul style="list-style-type: none"> ■ Émergence de la problématique des substances appauvrissant la couche d’ozone (SACO); ■ Le Québec intervient en 1993 et le fédéral en 1998; ■ Six règlements et une politique sont adoptés; ■ En 1998, la Politique de réhabilitation des terrains contaminés devient la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (PPSRTC); ■ En 1991 et en 1992, le gouvernement fédéral renouvelle sa réglementation sur les BPC par l’adoption de deux règlements : <ul style="list-style-type: none"> ○ Règlement sur les biphényles chlorés et ○ Règlement sur le stockage des matériels contenant des BPC ■ 1997 : Le Québec adopte le Règlement sur les matières dangereuses qui chapeaute toutes catégories de matières dangereuses.

Années	Législations
2000 à 2009	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dix-huit (18) règlements et 1 politique sont adoptés dont 14 pour Québec et 5 au fédéral; ■ Huit règlements concernent le domaine des matières dangereuses; ■ Au Québec, les règlements concernent les gaz à effet de serre (GES), les SACO et les produits pétroliers; ■ Au fédéral, des règlements sont adoptés sur le transport des marchandises dangereuses (2001) et les SACO (2003); ■ En 2000, adoption de la première politique relative à la gestion des matières résiduelles non dangereuses. C'est le début de l'ère de la priorisation entre les modes de gestion réduction à la source, réemploi, recyclage, valorisation et élimination des matières résiduelles (3RV-E); ■ Adoption au Québec du premier règlement sur le captage des eaux souterraines en 2002; ■ La PPSRTC (Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés) s'appuie sur trois règlements : <ul style="list-style-type: none"> ○ Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (2001); ○ Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés (2007); ○ Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (2003). ■ En 2003, le gouvernement fédéral adopte le Règlement sur les urgences environnementales, le seul visant spécifiquement les déversements accidentels et le rejet de certains contaminants dans l'environnement. Il prévoit la préparation et l'exécution de plans d'urgence environnementale pour certaines substances toxiques et dangereuses; ■ En 2008, adoption au fédéral d'un nouveau règlement sur les BPC. Ce règlement impose le retrait progressif entre 2014 et 2025 des appareils ayant des concentrations en BPC égales ou supérieures à 50 mg/kg.
2010 à 2019	<ul style="list-style-type: none"> ■ En 2011, le Québec adopte par le Règlement sur la récupération et la valorisation de produits par les entreprises. Ce dernier remplace les règlements suivants : <ul style="list-style-type: none"> ○ Règlement sur la récupération et la valorisation des huiles usées, des contenants d'huile ou de fluide et des filtres usagés (2004); ○ Règlement sur la récupération et la valorisation des contenants de peinture et des peintures mis au rebut (2000); ○ Politique québécoise de gestion des matières résiduelles; ○ Plan d'action de gestion des matières résiduelles 2011-2015. ■ En janvier 2011, le Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère (2007) est modifié avec l'inclusion de l'hexafluorure de soufre (SF₆) à la liste des GES dans le secteur « Transport et distribution d'électricité et utilisation d'équipements de production d'électricité »; ■ En janvier 2012, adoption du Règlement concernant le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre va permettre au Québec de participer au marché régional nord-américain du carbone de la Western Climate Initiative par l'instauration d'un marché du carbone au Québec.

➤ Législation actuelle

La législation actuelle cible deux aspects essentiels de la biosphère; à savoir, la santé et sécurité puis l’environnement (Dallaire, 2019). Aujourd’hui, une cinquantaine de lois, règlements, politiques et guides de bonnes pratiques s’appliquent aux différents aspects de la gestion des matières résiduelles (Olivier, 2015). Le tableau 2.8 ci-après liste les plus importants qui touchent directement ou indirectement le sujet des matières dangereuses résiduelles. À la suite du tableau, dans le contexte de cette étude, deux règlements seront présentés dans cette section, car ils contiennent l’essentiel des dispositions en lien avec les fluides de coupe résiduels. Il s’agit du Règlement sur les matières dangereuses, RLRQ c. Q -2, r. 32 et du Règlement sur le transport des matières dangereuses, RLRQ c. C -24.2, r. 43.

Tableau 2.8 : Principaux règlements et lois en gestion des matières dangereuses résiduelles (inspiré de Dallaire, 2019; ASFETM, 2014; Olivier, 2010)

Cible	Législation	Objectifs
Santé-Sécurité	Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST), RLRQ c. S -2.1	<ul style="list-style-type: none"> • Prévenir les lésions professionnelles en visant d’abord l’élimination du danger à la source; • Édicter des droits et des obligations pour les employeurs et les travailleurs.
	Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) RLRQ c. S-2,1, r. 13	<ul style="list-style-type: none"> • Donner les règles de sécurité minimales à respecter; • Indiquer comment éliminer les risques; • Édicter les obligations de moyens et de résultats.
	Règlement sur les établissements industriels et commerciaux, S-2.1, r. 6	Prescrire des directives pour la protection des travailleurs face aux risques professionnels.
	Code de la sécurité routière, RLRQ c. C -24.2	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer la sécurité des usagers; • Faciliter leur mobilité sur le réseau routier; • Améliorer le partage de la route.
Environnement	Loi sur la qualité de l’environnement, RLRQ c. Q -2	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer le cadre général de protection de l’environnement; • Doter le Québec d’un régime d’autorisation conforme aux standards pour la protection de l’environnement; • Améliorer l’accès à l’information pour le public
	Règlement sur les matières dangereuses, RLRQ c. Q -2, r. 32	Édicter les règles pour mieux gérer : <ul style="list-style-type: none"> • L’utilisation des matières dangereuses résiduelles à des fins énergétiques; • L’entreposage de matières dangereuses résiduelles; • Le dépôt définitif, le registre et le bilan annuel; • Le transport de matières dangereuses.
	Règlement sur le transport des matières dangereuses, RLRQ c. C -24.2, r. 43	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer le transport des matières dangereuses de manière sécuritaire; • Permettre la transmission de la bonne information aux transporteurs de matières dangereuses;

Cible	Législation	Objectifs
	Règlement sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles RLRQ, c. Q -2, r. 19	Régir l'élimination par enfouissement de toutes les matières résiduelles d'origine municipale, industrielle ou commerciale.
	Politique québécoise sur la gestion des matières résiduelles, Plan d'action 2019-2024	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter la hiérarchisation des 3RV-E; • Responsabiliser l'ensemble des acteurs; • Mettre en valeur 65 % des matières résiduelles produites.

○ Règlement sur les matières dangereuses, RLRQ c. Q -2, r. 32

Le Règlement sur les matières dangereuses en vigueur depuis le 1^{er} décembre 1997 remplace le règlement sur les déchets dangereux. Il comporte dix chapitres et onze annexes avec un champ plus large, car il traite aussi bien des résidus que des matières neuves dangereuses. Ce changement a permis la vulgarisation du principe des 3RV-E dans la gestion de ces matières. Il apporte une bonne compréhension de la portée du terme « matière dangereuse résiduelle ». Ainsi, il spécifie les matières reconnues comme dangereuses et celles qui ne le sont pas. De plus, il énonce les directives sur leur valorisation à des fins énergétiques, leur entreposage et la sécurité des lieux de stockage, les registres indispensables à tenir dans le cadre de leur gestion ainsi que les dispositions pénales en cas de non-respects des dispositions. (Dallaire, 2012)

De plus, ce règlement constitue un cadre moderne de gestion des matières dangereuses et permet d'instaurer une harmonie entre les dispositifs québécois, fédéraux et internationaux (MDDEP, 2002). Il énonce les propriétés comburantes, corrosives, explosives, gazeuses, inflammables, lixiviables, radioactives et toxiques de certaines matières. Aussi, spécifie-t-il les substances assimilables aux matières dangereuses telles que (MELCC, 2022) :

- huiles et graisses minérales ou synthétiques;
- récipients vides contaminés;
- cylindres de gaz ou les contenants aérosol renfermant une matière dangereuse;
- matières ou les objets ne contenant que 3 % ou plus en masse d'huile ou de graisse;
- matières ou les objets contenant plus de 1 500 milligrammes par kilogramme (mg/kg) d'halogènes organiques totaux;
- matières contenant des biphényles polychlorés (BPC) ou contaminées par des BPC;
- matières ou les objets contaminés en surface.

Par ailleurs, il fait mention des matières qui sont exclues de la définition des matières dangereuses. Ce sont entre autres, les :

- sols contaminés à l'exception des sols contenant plus de 50 mg de BPC par kg de sol;

- matériaux de construction, de démantèlement et de rénovation (sauf les matières assimilées à une matière dangereuse);
- ferrailles et autres objets de métal (sauf les matières assimilées à une matière dangereuse);
- tissus autres que les absorbants utilisés pour la récupération des matières dangereuses;
- déchets biomédicaux régis par le Règlement sur les déchets biomédicaux;
- matières résiduelles de fabriques de pâtes et papiers;
- pesticides régis par la Loi sur les pesticides;
- bouillies et rinçures (pesticides);
- eaux usées (sauf les bains de rinçage captifs pour le traitement de surface);
- résidus miniers;
- matériaux de dragage;
- neiges usées;
- matières radioactives;
- béton bitumineux, le bardeau d'asphalte, le plastique solide, le caoutchouc solide et l'amiante;
- boues d'une fosse septique ou d'un ouvrage municipal de traitement de l'eau;
- résidus d'un puits d'accès souterrain ou d'un puisard;
- purin et les fumiers;
- bois traité;
- résidus de déchiquetage des carcasses de véhicules automobiles;
- détecteurs de fumée;
- cendres et autres résidus provenant d'un incinérateur de déchets biomédicaux ou d'une installation d'incinération régie par le Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles.

Il convient de relever que les dispositions des articles 8, 13 et 14 s'appliquent à l'ensemble des matières dangereuses, qu'elles soient neuves ou résiduelles. C'est-à-dire l'interdiction de rejeter une matière dangereuse dans l'environnement (article 8), les mesures à prendre en cas de cessation d'activités ou de démantèlement de bâtiments (article 13) et la défense d'utiliser une huile comme abat-poussière (article 14).

Toutes les autres dispositions du RMD ne s'appliquent qu'aux matières dangereuses résiduelles. En outre, l'utilisation des matières résiduelles à des fins énergétiques est conditionnée par la sollicitation et l'obtention préalable d'une autorisation en vertu de l'alinéa 1 de l'article 70.9 et du paragraphe 5° de l'article 22 de la LQE. De même, la structure qui souhaite valoriser ses propres matières dangereuses résiduelles produites dans le cadre de ses activités doit aussi obtenir une autorisation préalable en vertu

de l'alinéa 2 de cet article 22. De même, une autorisation est demandée avant l'exécution des activités comme le :

- transport des matières dangereuses résiduelles vers un lieu d'élimination ou de traitement.
- exploitation, pour ses propres fins ou pour autrui, d'un lieu d'élimination de matières dangereuses ou l'offre d'un service d'élimination de matières dangereuses;
- utilisation à des fins commerciales, d'un procédé de traitement de matières dangereuses résiduelles;
- entreposage, après en avoir pris possession, des matières dangereuses résiduelles;

Les questions liées à la cession d'une autorisation délivrée traitées par l'article 31.0.2 de la LQE celles livrées sont valides pour une période maximale de cinq ans selon l'article 70.14 de la LQE. Cependant, cette validité ne s'applique pas pour certaines activités décrites à l'article 231 du REAFIE (Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement - Q-2, r. 17,1). En plus de l'autorisation, l'entreprise qui exerce une activité visée par l'alinéa 1 de l'article 70.9 de la LQE doit déposer une garantie et souscrire une assurance de responsabilité civile dont les montants sont fonction de l'importance du projet. De plus, des frais sont prévus pour la délivrance, le renouvellement ou la modification d'une autorisation. (MELCC, 2022)

En ce qui concerne l'entreposage, les normes prescrites par le RMD visent certains modes comme les conteneurs, les réservoirs, les citernes et en tas ainsi que la protection des lieux de stockage. De façon générale, ces dispositions sont applicables lorsque la quantité entreposée est supérieure à 100 kg. Mais pour l'entreposage dans les conteneurs, les réservoirs, les citernes et en tas, la limite applicable est de 1000 kg. Quant aux lieux de stockage, les exigences varient selon les catégories et les quantités de matières dangereuses entreposées, tel que décrit aux articles 84 à 92. Néanmoins, le règlement énonce des normes plus spécifiques pour les systèmes de détection d'intrusion, les systèmes de détection d'incendie et les systèmes d'extinction automatique d'incendie. (MELCC, 2022)

Pour le transport des matières dangereuses, l'article 230 du REAFIE indique qu'une autorisation est nécessaire pour transporter des matières dangereuses résiduelles vers un lieu d'élimination. En outre, les transporteurs de matières dangereuses résiduelles doivent souscrire une assurance responsabilité d'au moins un million de dollars qui couvre tous les véhicules de commerce puis déposer une garantie de 100 000 dollars avant d'obtenir une autorisation pour le transport de matières dangereuses vers un lieu d'élimination.

○ Règlement sur le transport des matières dangereuses

Le Règlement sur le transport des matières dangereuses en vigueur depuis le 15 août 2002 définit les exigences de sécurité durant la manutention, le transport et la circulation des matières dangereuses sur les voies publiques du Québec. Il considère le déplacement de la matière entre les lieux de fabrication ou de distribution et de livraison ou de destination (Dallaire, 2012). Il s'inspire fortement du règlement fédéral sur le transport des marchandises dangereuses de Transport Canada, car il résulte d'une étroite collaboration entre la province et le fédéral (Dallaire, 2012). Notamment, le système de classification utilisé pour identifier les matières concernées est celui émanant du règlement fédéral. Néanmoins, quelques nuances sont à relever au niveau du transport des sols contaminés où les références sont plutôt tirées de la politique québécoise des sols et de réhabilitation des terrains contaminés du MELCC.

Ce règlement permet, en somme, d'administrer entre autres, les documents d'expédition, l'étiquetage, les contenants, les sols contaminés, les produits pétroliers, les explosifs, la formation, les plans d'intervention d'urgence et les rejets accidentels (Dallaire, 2012). La Sûreté du Québec et la Société de l'assurance automobile du Québec ont la responsabilité d'assurer le respect de ce règlement. Pour ce faire, ils vérifient la conformité des chargements à travers des contrôles routiers fréquents. (Lussier, 2004) En outre, pour pouvoir transporter des matières résiduelles dangereuses en toute conformité, un transporteur doit obligatoirement détenir un permis de transport de matières dangereuses résiduelles délivré par le MELCC. Par ce permis, le titulaire peut transporter différents types de matières ou de sols contaminés qui peuvent porter atteinte à la santé humaine et à l'environnement. Les déchets transportés peuvent être sous la forme solide, liquide ou de boue semi-liquide. Pour les matières résiduelles explosives et radioactives, un contrôle extrêmement rigoureux est appliqué et seules quelques entreprises sont autorisées à les transporter.

Par ailleurs, la personne qui transporte les matières dangereuses doit être titulaire d'un certificat de formation ou travailler sous la supervision directe d'une personne qui possède la formation appropriée et qui est titulaire d'un certificat de formation comme le stipule le guide sur le transport des matières dangereuses. (Enviro-Urgence, 2020)

2.2.2 Au Fédéral

Le gouvernement fédéral du Canada réglemente les mouvements internationaux et interprovinciaux. Les textes juridiques majeurs en vigueur à ce jour sont les lois et règlements suivants :

- Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE) de 1999;
- Loi sur les produits dangereux LRC, 1985, ch. H-3;

- Règlement sur les produits dangereux, DORS/2015-17;
- Règlement sur les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses (RMT), entré en vigueur le 31 octobre 2021. Ce dernier remplace les trois (3) règlements suivants :
 - Règlement sur l'exportation et l'importation de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses (REIDDMRD), DORS/2005-149;
 - Règlement sur les mouvements interprovinciaux des déchets dangereux, DORS/2002-301;
 - Règlement sur l'exportation de déchets contenant des BPC (1996), DORS/97-109.
- Règlement sur les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses

Le Règlement sur les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses (RMT) permet de prendre en considération les changements dans la classification des déchets dangereux et des matières recyclables dangereuses. Il garantit que les déchets dangereux et matières recyclables dangereuses expédiés et reçus qui traversent les frontières internationales, interprovinciales et territoriales du Canada atteignent leur destination sans risques de rejet de contaminants dans l'environnement. En d'autres termes, il a pour objet d'abord de garantir que les déchets dangereux et les matières recyclables dangereuses qui franchissent les frontières internationales canadiennes par importation, par exportation ou par transit sont convenablement gérés avec l'assurance de protection de l'environnement et la santé humaine. Ensuite, il vise à mettre en œuvre les obligations et engagements internationaux du Canada énoncés dans les accords mentionnés ci-après en matière de mouvements transfrontaliers Gouvernement du Canada (2021) :

- Convention de Bâle des Nations Unies sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination (Convention de Bâle);
- Décision OECD/LEGAL/0266 du Conseil de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets destinés à des opérations de valorisation (Décision de l'OCDE);
- Accord entre le gouvernement du Canada et le gouvernement des États-Unis d'Amérique concernant les déplacements transfrontaliers de déchets dangereux (Accord Canada États-Unis);

- Arrangement entre le gouvernement du Canada et le gouvernement des États-Unis d'Amérique concernant la gestion écologiquement rationnelle des déchets et débris non dangereux faisant l'objet de mouvements transfrontières.

➤ Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE)

Elle vise à prévenir la pollution et la protection de l'environnement et de la santé humaine pour assurer un développement durable. La section 7 de la partie 7 se consacre au contrôle des mouvements de déchets dangereux ou de matières recyclables dangereuses.

2.2.3 Ailleurs au Canada

L'analyse de la réglementation dans les autres provinces du Canada permet de relever des similitudes à quatre niveaux (Alguima M.A., 2014).

➤ Autorisations

Il est obligatoire de disposer d'une autorisation délivrée par les autorités compétentes avant d'entreprendre toute activité de production ou gestion des matières dangereuses résiduelles.

➤ Entreposage

Les configurations et modalités d'entreposage doivent être respectées.

➤ Registre

La production et la tenue d'un registre et des bordereaux de suivi sont indispensables. Ils permettent d'assurer la traçabilité des mouvements de déchets (matières résiduelles).

➤ Sécurité

Les employeurs ont obligation de prendre les mesures nécessaires pour maintenir la sécurité et protéger la santé et l'intégrité physique des travailleurs. Cela pourrait inclure entre autres, l'élaboration de plan d'urgence, la fourniture de matériels de sécurité et la formation continue des agents. Le tableau 2.9 ci-après fait une compilation des lois, règlements et normes appliqués dans les provinces du Canada.

Tableau 2.9 : Synthèse du cadre normatif et réglementaire des provinces et territoires du Canada Adapté de Alguima, 2014

Provinces et territoires	Lois	Règlements
Alberta	Loi sur la protection et l'amélioration de l'environnement, RSA 2000, c. E -12	Règlement sur le contrôle des déchets, Alta Reg 192/1996
	Loi sur le transport et la manutention des marchandises dangereuses, RSA 2000, c. D-4	Règlement sur le transport et la manutention des marchandises dangereuses, Alta Reg 157/1997
	Loi sur la santé et la sécurité au travail, RSA 2000, c. O -2	Règlement sur la santé et la sécurité au travail, Alta Reg 62/2003
Colombie — Britannique	Loi sur la gestion de l'environnement, SBC 2003, c 53	Règlement sur les déchets dangereux, BC Reg 63/88
	Loi sur le transport des marchandises dangereuses, RSBC 1996, c. 458	Règlement sur le transport des marchandises dangereuses, BC Reg 203/85
	Loi sur les accidents du travail, RSBC 1996, c 492	Règlement sur la santé et la sécurité au travail, BC Reg 296/97
Île du prince Édouard	Loi sur la protection de l'environnement, RSPEI 1988, c E-9	Règlement sur la gestion des ressources en déchets, PEI Reg EC691/00
	Loi sur les marchandises dangereuses (transport), RSPEI 1988, c D-3	
	Loi sur la santé et la sécurité au travail, RSPEI 1988, c O-1.01	Règlement sur le système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail, PEI Reg EC557/88
Manitoba	Loi sur l'environnement, CPLM c E125	
	Loi sur la réduction du volume et de la production des déchets, CPLM c W40	Règlement sur la gestion de l'huile utilisée et des filtres à huile et contenants usagés, Règl du Man 86/97
	Loi sur la sécurité et l'hygiène du travail, CPLM c W210	Règlement sur la sécurité et la santé au travail, Règl du Man 217/2006
Nouveau Brunswick	Loi sur l'assainissement de l'environnement, LRN-B 1973, c C-6	Règlement sur l'huile usée, Règl du N-B 2002-19
	Loi sur le transport des marchandises dangereuses, LRN-B 2011, c 232	
	Loi sur l'hygiène et la sécurité au travail, LN-B 1983, c O-0.2	Règlement relatif au Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail, Règl du N-B 88-221
Nouvelle Écosse		Règlement sur la désignation des activités, NS Reg 47/95
	Loi sur l'environnement, SNS 1994-95, c 1	Règlement sur la gestion des marchandises dangereuses, NS Reg 56/95
	Loi sur la santé et la sécurité au travail, SNS 1996, c 7	Règlement sur les huiles usées, NS Reg 51/95 Règlement sur le système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail, NS Reg 196/88
Territoire du Nunavut	Loi sur la protection de l'environnement, LRTN-O (Nu) 1988, c E-7	

Provinces et territoires	Lois	Règlements
	Loi sur la directive environnementale pour la gestion générale de la sécurité des déchets dangereux, RSNWT (Nu) 1988, c S-1	Règlement sur le système d'information sur les matières dangereuses de chantier, RRNWT (Nu) 1990 c S-2
Ontario	Loi sur la protection de l'environnement, LRO 1990, c E.19	Règlement sur la gestion générale des déchets, RRO 1990, Reg 347
	Loi sur la santé et la sécurité au travail, LRO 1990, c O.1	Règlement sur sensibilisation à la santé et à la sécurité au travail et formation, Règl de l'Ont 297/13
		Règlement sur le Système d'information sur les matériaux dangereux utilisés au travail (SIMDUT), RRO 1990, Règl 860
Saskatchewan	Loi de 2002 sur la gestion et la protection de l'environnement, SS 2002, c E-10.21	Règlement sur les substances et déchets dangereux, E-10.2 Reg 3
	Loi sur le transport des marchandises dangereuses, SS 1984-85-86, c D-1.2	
	Loi sur l'emploi de la Saskatchewan, SS 2014, c S-15.1	

2.3 Portrait de la gestion des matières dangereuses

Les industries, les commerces et les institutions produisent dans le courant de leurs activités, des matières résiduelles de propriétés physiques, chimiques et biologiques variables conférant à certaines, le caractère dangereux. Il est donc nécessaire de les gérer d'une manière particulière afin de limiter leur impact nuisible sur l'environnement et à la santé. (MELCC, s.d.) La gestion des matières dangereuses résiduelles prend en considération la finalité ou mode de gestion de ces dernières. En effet, les matières résiduelles en général et celles qui sont dangereuses en particulier n'ont pas uniquement pour vocation d'être éliminées soit par enfouissement ou par incinération. (Lussier, 2003) Elles apparaissent comme des ressources, des intrants pouvant intervenir dans d'autres processus de production ou d'usage. Cet aspect contribue à faire émerger le concept de déchets-ressources encouragé par les modes de gestion selon les 3RV-E (Dallaire, 2019). Ces modes de gestion comprennent entre autres :

- la réduction des quantités de matières dangereuses produites;
- le traitement en vue de réduire le caractère dangereux;
- le traitement en vue de réemploi ou recyclage;
- l'entreposage sécuritaire;
- l'utilisation à des fins énergétiques;
- l'élimination.

2.3.1 Gestion des MDR au Québec

Selon la Loi sur la qualité de l'environnement et le règlement sur les matières dangereuses (RMD), des producteurs de matières dangereuses ont l'obligation de transmettre au ministère un bilan ou rapport annuel de la gestion de leurs matières dangereuses résiduelles.

➤ **Données quantitatives des matières dangereuses résiduelles**

Les données de 2012 à 2018 indiquent qu'environ 350 000 tonnes de matières dangereuses résiduelles sont produites annuellement au Québec (MELCC, 2021). Le tableau 2.10 ci-dessous donne la répartition des tonnages produits par secteur industriel.

Tableau 2.10 : Bilan quantitatif des matières dangereuses résiduelles par secteur économique (tiré de MELCC, 2021)

Description de la source de MDR	Quantité (kg)
Industries de première transformation des métaux	253 861 172
Industries des produits du pétrole et du charbon	32 145 049
Industries chimiques	14 682 329
Industries du matériel de transport	12 516 451
Industries de la fabrication des produits métalliques	12 496 568
- Autres industries de produits en métal	5 019 245
- Autres industries des produits en fil métallique	4 819 931
- Industrie des fils et des câbles métalliques	1 101 444
- Ateliers d'usinage	952 440
- Industrie du revêtement sur commande de produits en métal	375 694
- Industrie des soupapes en métal	143 932
- Industrie des récipients et fermetures en métal	61 729
- Autres industries des produits métalliques d'ornement et d'architecture	22 152
- Industries des articles de quincaillerie, d'outillage et de coutellerie	5 429
Mines de métaux	10 383 007
Production et distribution d'électricité	4 231 776
Industries du papier et des produits en papier	3 768 519
- Autres industries du papier	1 781 592
- Industrie des pâtes à papier	1 529 981
- Industrie du papier journal	302 790
- Industrie du carton	137 142
- Industrie des panneaux et du papier de construction	17 015
Industries simultanément actives dans plusieurs secteurs	3 112 354
Industries des produits électriques et électroniques	1 576 145
Secteur d'activité économique non déterminé ou non visé	393 104
Industries du bois	444 911
- Industrie des panneaux agglomérés	263 699
- Industrie de la préservation du bois	181 212
Possession de matières ou objets contenant des BPC ou contaminés par des BPC	249 763
Tanneries	167 406
TOTAL GÉNÉRAL	350 033 982

Ces données indiquent que l'industrie de première transformation des métaux produit à elle seule, près de 73 % des matières résiduelles dangereuses avec 253 861 tonnes. De plus, la Montérégie et la Côte-Nord participent à hauteur respective de 32 % et 20 % de ce bilan (MELCC, 2021). En outre, la catégorie des solides et boues inorganiques suivant l'annexe 4 du RMD contribue pour 65 % à la quantité de matières dangereuses au Québec quand les huiles et graisses minérales ou synthétiques sont à 6 %. Les détails sont mentionnés dans l'annexe 3. Les quantités moyennes annuelles traitées quant à elles sont d'environ 644 kilotonnes (MELCC, 2021) comme détaillées dans l'annexe 4. Cet écart entre la production et le traitement s'explique par le volume important de matières importées des autres provinces du Canada ou à l'international et traités par les installations du Québec.

Le mode de gestion comporte trois voies principalement, à savoir, le traitement, la valorisation à des fins énergétiques et l'élimination. Le traitement représente 76 % des modes de gestion de MDR déclarés contre 22 % pour l'élimination et à 2 % pour l'utilisation à des fins énergétiques. Néanmoins, le traitement demeure très souvent une étape transitoire avant le recyclage ou l'élimination. (MELCC, 2021) En plus, trois parties prenantes importantes interviennent dans le processus de production et de gestion des MDR. Ce sont les producteurs de MDR, les transporteurs et les gestionnaires de MDR. La figure 2.2 dessous schématise les différentes avenues possibles des MDR, de la production à la gestion ainsi que les obligations légales associées à chaque étape. Ainsi, la matière dangereuse résiduelle produite est soit transportée vers un lieu de traitement et/ou de valorisation, soit vers un lieu d'élimination.

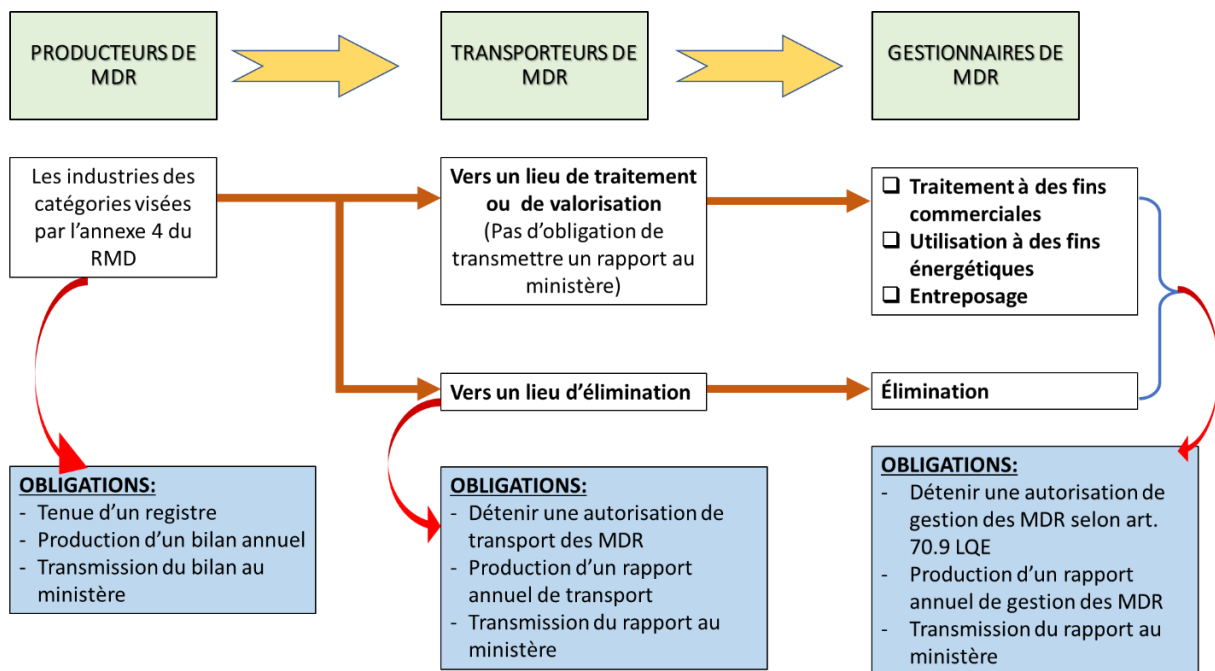


Figure 2.2 : Suivi des MDR de la production à la gestion (adapté de MELCC, 2021)

➤ La hiérarchisation des modes de gestion

Conformément aux directives de la politique québécoise de gestion des matières résiduelles et du RMD, les actions menées pour la gestion des matières dangereuses résiduelles doivent prioriser la hiérarchisation des 3RV-E. Il s'agit de la réduction à la source des déchets, le réemploi, le recyclage, la valorisation à des fins énergétiques et l'élimination telle qu'illustrée sur la figure 2.3 ci-dessous.



Figure 2.3 : Hiérarchisation des 3RV-E (tiré de Bouchard-Martel, 2016)

De plus, Olivier (2015) fait la distinction nette entre le réemploi (sans modification), la réutilisation (dans un autre cycle de production) et le recyclage (retour dans le procédé de fabrication) en plus de la prise en considération de la récupération (collecte), à travers le concept des 5RV-E. Selon lui, il est impératif de respecter l'ordre suivant pour assurer un mode gestion plus efficient : Réduction à la source, récupération par les activités de collecte, réemploi sans modification, recyclage dans le procédé de fabrication, réutilisation par un autre cycle de production, valorisation énergétique et élimination par enfouissement ou incinération. Le caractère particulier (dangereux) de ces matières impose que chacune des étapes chronologiques de gestion soit menée avec précaution. En outre, la figure 2.4 ci-après présente les options de gestion d'une matière dangereuse résiduelle au Québec. Celle qui implique le traitement jusqu'à la réutilisation de la matière dangereuse résiduelle traitée et marquée en rouge est l'objet de notre présente étude. Par conséquent, les autres options, à savoir, le traitement par stabilisation et solidification, le réemploi (sans traitement), le recyclage (retour dans le procédé de fabrication), la valorisation et l'élimination des MDR non traités ne seront pas abordés dans ce rapport.

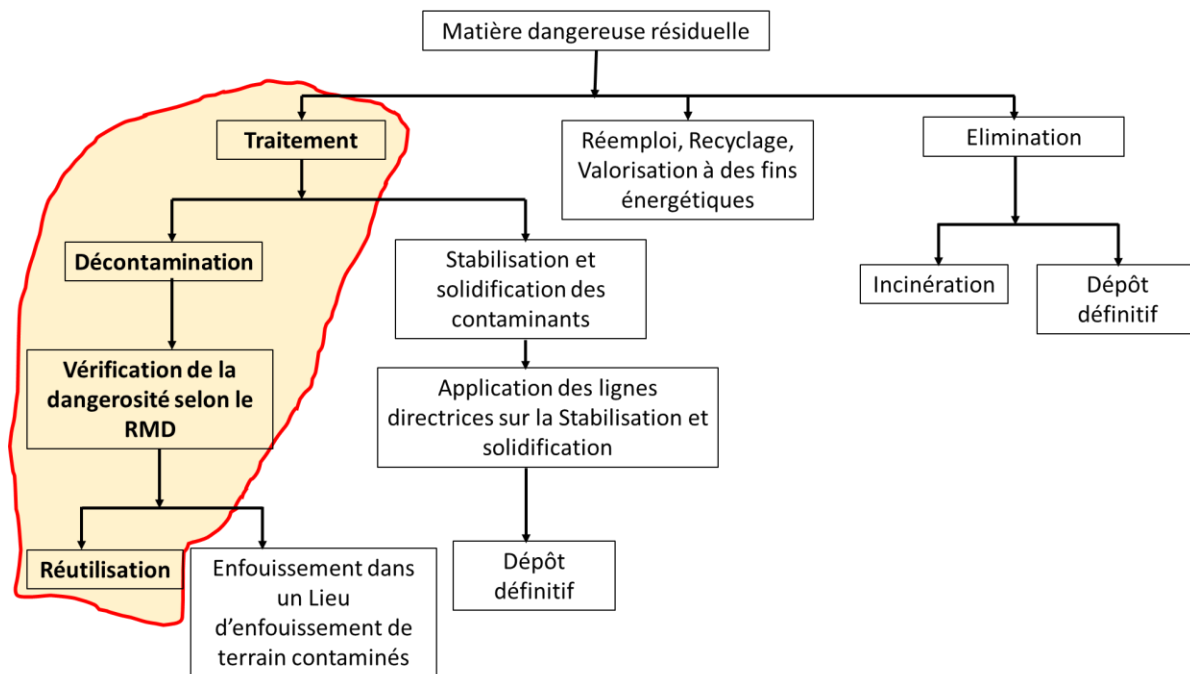


Figure 2.4 : Schéma des options de gestion d'une matière dangereuse résiduelle (adapté de MELCC, 2021)

○ Prévention de la pollution : La réduction à la source, réemploi, recyclage et valorisation

Il est indispensable d'adopter une attitude et des pratiques de gestion performantes et proactives. La prévention de la pollution à travers la méthode des 3RV s'avère adéquate pour atteindre ce but (MELCC, s.d. a et b). La réduction à la source est le mode de gestion le plus en amont du processus. Ce premier maillon du processus doit être encouragé et préconisé. Elle consiste à réduire la quantité de matières dangereuses résiduelles générée lors de la fabrication, de la distribution et de l'utilisation d'un produit (RECYC-QUÉBEC, 2012), à limiter la dangerosité et à faciliter les processus de traitement (Olivier, 2015 ; ADEME, 2020). Elle permet donc de limiter les impacts des MDR en plus de réduire considérablement les coûts engendrés par leur gestion (Alguima, 2014).

Pour y parvenir, plusieurs attitudes et pratiques existent en fonction des facteurs inhérents à leur production et à leur typologie. Pour les matières dangereuses résiduelles objet de notre étude, à savoir les liquides de refroidissement utilisés des machines CNC, l'une des pratiques de prévention déterminée est l'allongement de la durée d'utilisation des liquides préparés. En d'autres termes, il s'agit de réemployer plusieurs fois les liquides préparés, marqués par des étapes de traitement et de décontamination dans le but de réduire le volume de rejet par unité de temps.

○ Sécurité

La gestion des MDR impose des mesures de sécurité adéquates. La loi sur la santé et la sécurité du travail ainsi que les règlements sur les matières dangereuses et leur transport spécifient des directives strictes en matière de sécurité des opérations, des installations et des personnes. Il est donc recommandé de porter les équipements de protection individuelle adaptés, dont les gants, le couvre-visage, les lunettes de sécurité ou tout autre équipement nécessaire à la protection de la personne qui manipule des matières dangereuses (MELCC, s.d. b).

○ Entreposage

Vu les risques considérables pour la santé et l'environnement, les MDR doivent être entreposées en respectant les normes de sécurité en vigueur, notamment l'étiquetage, les incompatibilités, les contenants et les signalisations. Ainsi, les produits doivent porter des étiquettes visibles qui renseignent sur le type et le contenu. Ceci permet d'être informé sur les précautions à respecter pendant l'utilisation, le tri et l'entreposage. Au Québec, le RTMD et le SIMDUT imposent des directives pour l'identification des contenants des matières dangereuses (Alguima, 2014). De même, l'affichage des numéros d'urgence est indispensable dont le Centre antipoison du Québec (MELCC, s.d. b).

2.3.2 Gestion des MDR à Verbom Inc.

Cette étude ne porte que sur les fluides résiduels issus des machines à commande numérique (CNC).

Le liquide aqueux est formé avec l'huile CIMPULSE 45 MP à hauteur de 3 à 5 % complétée avec 95 à 97 % d'eau dans le contenant présenté sur la figure 2.5 ci-après.



Figure 2.5 : Récipient de préparation du mélange aqueux (prise à Verbom Inc. Valcourt, aout 2022)

Le récipient cylindrique est déposé dans un support rectangulaire sur roues tenant lieu de bassin de rétention pour prévenir les déversements accidentels. C'est à partir de ce contenant que le produit prêt à

l'usage est pompé pour alimenter les différentes machines CNC. Le liquide de refroidissement utilisé à l'intérieur des CNC est recueilli par aspiration avec le dispositif présenté sur la figure 2.6 et stocké dans le contenant exposé sur la figure 2.7.



Figure 2.6 : Dispositif d'aspiration du fluide de coupe usé de l'intérieur des CNC (prise à Verbom Inc. Valcourt, aout 2022)



Figure 2.7 : Contenant de stockage du fluide de coupe usagé (prise à Verbom Inc. Valcourt, aout 2022)

La coque extérieure en acier visible sert aussi de bassin de rétention. Elle accueille un contenant de plastique d'une capacité de 1000 litres. L'usine U1 de Verbom Inc. à Valcourt dispose de 4 dispositifs de ce genre pour le stockage sécuritaire du liquide usé avant la prise en charge par l'entreprise GFL Environmental mandatée pour disposer de cette matière (Verbom, 2022).

3. SPÉCIFICITÉ DES LIQUIDES DE REFROIDISSEMENT DES MACHINES

La transformation d'une pièce métallique se fait suivant deux techniques principalement : la déformation plastique modifie la forme initiale de la pièce par ductilité de la matière alors que l'usinage la modifie par découpe et enlèvement de copeaux. Le présent essai concerne uniquement l'usinage mis en œuvre lors des opérations de meulage, sciage, tournage, fraisage, décolletage, forage et autres. Ce travail des métaux se fait à l'aide de machines-outils conçues pour modéliser la pièce par riflage des portions non utiles sous forme de copeaux ou de particules. (Hamdache, 2012) La figure 3.1 ci-dessous donne un aperçu du processus mis en œuvre chez Verbom Inc. en classant les intrants nécessaires (énergie, fluide de coupe) et les produits et extrants (brouillards d'huile, fluide de coupe utilisé, résidus solides).

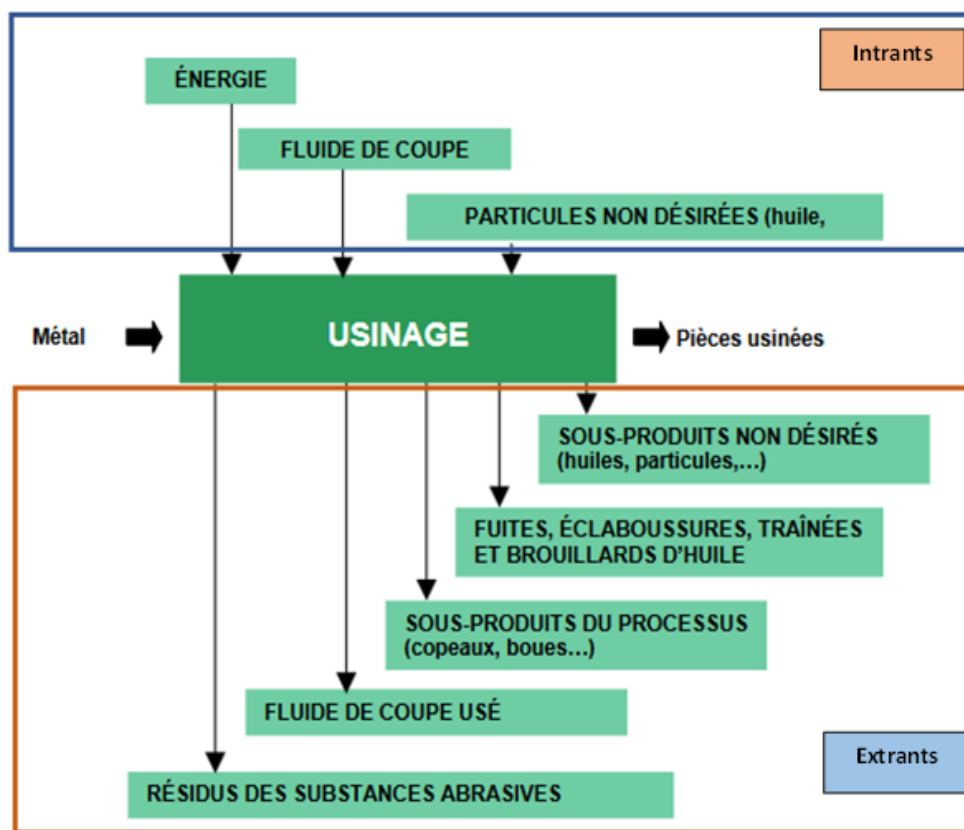


Figure 3.1 : Schématisation du processus d'usinage (modifié de Centre d'activités régionales pour la production propre, 2005)

3.1 Utilisation des fluides de coupe

Le fluide de coupe ou fluide de refroidissement est intimement lié aux opérations d'usinage des métaux (Delaval et coll., 2020). Selon Jedrzejak (2002), l'industrie mécanique utilise environ 600 000 m³ de liquide de refroidissement par an en France. C'est un liquide appliqué par arrosage sur la partie en action de l'outil

en vue de faciliter l'opération d'usinage tout en augmentant la productivité et la durée de vie de celui-ci (CRAMIF, 2011). Ils sont utilisés pour absorber la chaleur émise par la coupe, limitant ainsi la distorsion du métal pour un meilleur contrôle des contours et dimensions de la pièce (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984). Les fluides de coupe sont employés pour lubrifier, refroidir et éliminer les débris de coupe lors des différentes étapes d'usinage des pièces métalliques. Ils sont utilisés dans deux grands secteurs industriels : le travail des métaux et l'automobile. (Wild, 2018)

Le processus engendre des frottements, de la chaleur importante, des émissions de particules en suspension et cause l'usure du matériel. Alors, pour réduire ces effets, l'eau de savon était initialement utilisée. Cependant, elle présente des limites face à la corrosion en plus de tacher les pièces et les machines. Alors, l'eau de savon fut progressivement remplacée par les huiles végétales ou animales, puis par les émulsions d'huiles minérales et finalement par des mélanges d'huiles minérales et de matières grasses avec des additifs pour améliorer leur qualité. En plus des propriétés de refroidissement et de lubrification, les fluides de coupe permettent d'évacuer les copeaux afin de maintenir la surface de travail propre et d'assurer un environnement non corrosif pour la machine et la pièce usinée. (Hamdache, 2012) En outre, la performance de refroidissement d'un fluide de coupe est liée à sa conductivité et sa capacité calorifique. L'eau pure pourrait convenir, mais les huiles entières ou les émulsions d'huiles et d'eau sont préférées pour empêcher la rouille des pièces et des outils. Cependant les fluides aqueux sont beaucoup plus complexes au niveau chimique et leur utilisation croissante au détriment des huiles minérales engendre des problématiques supplémentaires (Wild, 2018). Par ailleurs, Wild (2018) soutient que 990 000 travailleurs seraient exposés à ces substances en France contre 150 000 environ en Suisse.

Plusieurs procédés d'usinage nécessitent l'application des fluides de coupe lors des opérations (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984). Il s'agit du :

- Sciage et limage : Ils visent à sectionner des pièces suivant des dimensions définies. Les outils utilisés sont principalement les scies à arc, à bande ou circulaires. Néanmoins, il n'est pas nécessaire d'utiliser un fluide de coupe pour les travaux avec les scies à ruban sur le métal mince peu induré;
- Perçage : Il peut se faire avec les tours, fraiseuses, aléseuses et presse-poinçons. Mais, les perceuses sont mieux adaptées avec des spirales coupantes. Il en existe de divers types : perceuse d'établi, perceuse sensitive, perceuse à colonne, perceuse à broches multiples, perceuse multibroche et perceuse radiale. L'outil est monté sur un axe de rotation supporté par une colonne et la pièce à percer est fixée sur une table;
- Fraisage : Il sert à produire une surface plane. Son fonctionnement consiste à faire tourner l'outil muni de dents sur un axe. Le mouvement permet d'arracher les copeaux du métal usiné. Il existe deux types

de fraisage, selon l'axe de rotation. Le fraisage périphérique lorsque la surface à usiner est parallèle à l'axe de rotation ou fraiseuse horizontale alors qu'une surface est perpendiculaire à l'axe de rotation requiert un fraisage facial ou fraiseuse verticale;

- Tournage : utilisée pour les pièces cylindriques, la broche de tournage inculque la vitesse à la barre de métal fixée sur le support. Les tours sont adaptés pour ces opérations qui parfois, ne nécessitent pas l'usage de fluide de coupe;
- Le formage et le rabotage : La pièce est fixe, mais l'outil fait des mouvements de va-et-vient. Les fluides de coupe sont utilisés en faible quantité;
- L'alésage : Il s'agit par ce procédé d'agrandir un trou existant dans le métal usiné;
- Rectifiage : C'est une opération de finition qui consiste à donner une forme polie à la pièce usinée à l'aide de disques et d'abrasifs. Il existe quatre types : les rectifieuses cylindriques, internes, planes et d'outils;
- Électroérosion : Le métal est usiné par l'action répétée d'une étincelle électrique de haute intensité entre la pièce et l'électrode. La décharge électrique qui se produit toutes les 10 à 30 microsecondes quand la tension est supérieure à 12 volts.

À Verbom Inc., les opérations de sciage, limage, perçage, fraisage, tournage, formage, rabotage, alésage, rectifiage et d'électroérosion des pièces sont réalisées dépendamment de la taille et de la complexité de l'usinage sur des grindings, des meules ou des CNC.

3.2 Classification des fluides de coupe

La norme NF ISO 6743-7 fournit une classification détaillée des fluides de coupe, quelle que soit la nature du travail des métaux. Ils sont classés en deux grandes catégories, selon leur composition : les huiles entières de coupe qui sont anhydres et donc employées sans apport d'eau, puis les fluides aqueux livrés concentrés et préparés par dilution à faible concentration dans de l'eau. (Wild, 2018; Hamdache, 2012 et INRS, 2006). De plus, elles contiennent généralement des additifs pour en modifier des propriétés additionnelles (Recommandation, 2015). Les voies d'exposition sont l'inhalation de brouillard d'huile et le contact cutané lors des opérations par manipulation, nettoyage ou entretien de l'espace de travail (Presta, 2019).

Le choix du type de fluide de coupe est conditionné par les matériaux à usiner et de la technique employée. Dans le cadre de ce travail, les études se limiteront aux fluides aqueux qui sont ceux utilisés dans l'environnement de Verbom Inc.

3.2.1 Huiles entières

Les huiles entières ou huiles d'usinage, aussi appelées « neat oils » ne contiennent pas d'eau et la propriété dominante est la lubrification. Elles sont utilisées pour leur propriété lubrifiante et sont formées de l'une ou l'autre des trois types de base (ASFETM, 2021 et Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail de France, 2012) :

- huiles minérales pétrolières obtenues par distillation sous vide du résidu de distillation atmosphérique du pétrole brut. Depuis les années 1980, ces huiles sont plus raffinées et leur teneur en HAP a totalement diminué. Néanmoins, pendant l'utilisation, dans des conditions de haute température, elles peuvent se charger en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP);
- huiles synthétiques produites par l'industrie chimique et composées à partir d'hydrocarbures polyalkylbenzènes. Ces huiles peuvent, elles aussi, s'enrichir en composés toxiques lors de leur utilisation;
- huiles végétales de colza, de soja ou de tournesol.

Les huiles entières sont à la base de maladies cutanées et respiratoires par inhalation d'aérosols. En France, les affections provoquées par les huiles et graisses minérales ou synthétiques et celles qui sont cancéreuses et issues des dérivés du pétrole peuvent être reconnues comme maladies professionnelles par le régime général de la sécurité sociale. Par ailleurs, en cours d'utilisation, les huiles entières se chargent en particules métalliques qui peut accroître l'effet nocif sur les voies respiratoires et cutanées. Par exemple, dans certaines conditions d'usinage, elles s'enrichissent en HAP reconnus comme cancérigène. (Recommandation, 2015)

3.2.2 Fluides aqueux

Les fluides aqueux sont utilisés pour leur bonne qualité de refroidissement des pièces usinées et des équipements. Dans le mélange formé en toute proportion, la concentration du produit varie entre 1 et 10 % pour 90 à 99 % d'eau. Ils sont composés de trois variantes selon la nature et la proportion des produits concentrés de départ, à savoir les (Recommandation, 2015 et Hamdache, 2012) :

- huiles solubles ou macroémulsions qui contiennent plus de 50 %, voire 80 % d'huile minérale ou végétale. Elles se forment par dispersion dans l'eau de petites quantités d'huiles minérales, synthétiques ou végétales stabilisées par un émulateur. Elles forment donc des solutions très stables, de couleur blanchâtre. La taille des gouttelettes d'huiles dispersées dans l'eau de l'ordre du micromètre, généralement supérieure à 0,1 μm ;

- fluides semi-synthétiques ou microémulsions contiennent moins de 50 % d'huile minérale ou végétale. Le produit concentré de base se compose d'une faible proportion d'huile minérale et une forte quantité d'agents émulateurs et d'agents anticorrosion. L'aspect varie entre le laiteux bleuté et le translucide selon la concentration de l'huile de base utilisée. Les gouttelettes dispersées dans l'eau sont de l'ordre de 10 à 100 nanomètres (nm);
- fluides synthétiques ou solutions vraies ne contiennent pas d'huile minérale, mais sont préparés avec des substances aux propriétés détergentes et des additifs qui facilitent le mouillage et donc le refroidissement. Les produits éthoxylés, les polyglycols et leurs esters, l'acide borique et certains acides organiques sont les plus fréquemment utilisés pour composer ces solutions vraies d'aspect transparent. Les gouttelettes très fines sont de taille inférieure à 10 nm.

Les solutions vraies et les microémulsions ont une durée d'utilisation plus longue par rapport aux macroémulsions qui elles, présentent des qualités de lubrification meilleures (Hamdache, 2012).

Les fluides aqueux, tout comme les huiles entières, peuvent comporter des risques pour ceux qui les utilisent. Elles provoquent des irritations et des allergies à cause de certains additifs comme les biocides ou par des métaux dissouts comme le cobalt.

3.3 Composition chimique des fluides de coupe

La composition des fluides de coupe est complexe et varie considérablement à l'intérieur de chacune des familles. Cependant, en règle générale, ils contiennent des composants principaux et des additifs. Par ailleurs, ces fluides peuvent, lors de leur utilisation en usinage, subir une évolution de leur composition, soit par réactions chimiques ou sous l'effet de microorganismes qui peuvent conduire à la formation de substances plus ou moins dangereuses (CCHST, 2022).

3.3.1 Les composants principaux

Les huiles de base jouent le rôle de lubrifiant. Elles sont formées essentiellement de :

- huiles minérales entières d'hydrocarbures paraffiniques, alicycliques, naphthéniques et aromatiques;
- huiles minérales raffinées en proportion variables de solvants pétroliers, white-spirit (distillat, naphta lourd) ou fuel;
- huiles synthétiques de polyalkylbenzènes.

Ensuite, les émulateurs qui facilitent l'émulsion stable de l'huile et de l'eau. Ce sont des tensioactifs de type anionique tels que les savons alcalins, les savons aminés, les sulfonates de sodium, les oxydes polyéthyléniques, la triéthanolamine, les sels d'acides gras et les agents surfactants non ioniques (Hamdache, 2012).

3.3.2 Les additifs

Pour augmenter leur performance pendant l'utilisation, des additifs sont adjoints à ces fluides. Ils accentuent des propriétés d'onctuosité, d'anti-usure, d'inhibiteurs de corrosion et de biocide. Ces additifs ont pour but d'augmenter les propriétés lubrifiantes, faciliter la coupe, limiter l'usure de l'outil, réduire la corrosion et la formation de brouillard puis contenir le développement des microorganismes pouvant coloniser les fluides aqueux. Ils peuvent contenir divers agents d'addition (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2022, Hamdache, 2012 et Techniques de l'ingénieur, 2005) :

- Anti-usures : Réduire le coefficient de friction et d'empêcher le contact métal-métal. Ils contiennent des corps gras naturels comme les glycérides (huile de lard, huile de colza, huile de ricin), des esters synthétiques (triméthylphénol [TMP], esters méthyliques, esters d'acides dicarboxyliques), des acides gras (acide oléique, acide stéarique, acide palmitique) et des alcools gras (alcool cétylique, alcool laurique, alcool oléique);
- Démoussants : Favoriser sa désaération en empêchant le moussage par la présence de silicones, de polysiloxanes et de cires;
- Biocides et fongicides : Réduire la prolifération des bactéries, champignons et levures dans les fluides. Il existe plusieurs types dont les biocides organiques (hexahydrotriazine, o-formal, dérivés nitrés, chlorométhyle), les biocides inorganiques (borates, complexes cuivrés), les fongicides (omadine, octylisothiazolone) et d'autres composants comme le phénoxyéthanol;
- Inhibiteurs de corrosion : Empêcher la corrosion des pièces et des machines-outils. Il en existe pour les métaux ferreux (savons d'acides polycarboxyliques, imidazoline, sulphonamides, sarcosines, sulfonates, les savons à base d'acides gras, les amines et l'acide borique) puis pour les métaux non ferreux (benzotriazole, mercaptobenzothiazole);
- Additifs extrême-pression : Les corps gras sulfurés, les paraffines chlorées, les dérivés phosphoreux réagissent sur la pièce usinée et sur l'outil en formant une couche solide lustrante et résistante à la compression et au cisaillement;
- Agents mouillants : Augmenter l'effet refroidissant du produit;
- Colorants : Donner une couleur au produit transparent de départ. Les fluoescéines et l'hélianthine sont les plus fréquemment employées dans le cas des microémulsions et des solutions vraies;
- Produits odorants et parfums : Dissimuler les odeurs désagréables de certains constituants;
- Eau : Stabiliser les composés à faible proportion d'huile minérale et solubiliser les additifs hydrophiles.

Le tableau 3.1 ci-après fait la synthèse des additifs aussi bien pour les huiles entières que les fluides aqueux ainsi que leur fonction respective.

Tableau 3.1 : Additifs pour les huiles entières et huiles solubles (adapté de Hamdache, 2012)

Additif	Fonction	Exemple
Agent d'onctuosité	Augmenter la résistance du film	Ester de polyol
Émulsifiant	Disperser le pétrole dans l'eau, améliorer le mouillage de la pièce	Sulfonate de pétrole, sels des acides gras, surfactants non ioniques
Alcanolamine	Fournir une réserve d'alcalinité	Monoéthanolamine, triéthanolamine
Agent extrême-pression	Lubrifier sous haute pression	Matières grasses sulfurées, paraffines chlorées, dérivés du phosphore
Biocide	Réduire les microorganismes	Triazine, oxazolidine
Agent de couplage	Améliorer la solubilité de divers additifs dans le fluide	Alcool gras
Passivant des métaux	Protéger le métal nouvellement coupé de la corrosion	Triazole
Antimousse	Réduire la production de mousse	Alcool gras de longue chaîne de carbone
Inhibiteur de corrosion	Protéger la pièce et la machine	Sulfonate de sodium, savon à base d'acides gras, amines
Colorant	Esthétique et identification	
Antioxydant	Réduire l'oxydation des fluides	Phénol alkylé
Antibrouillard	Réduire la formation des aérosols	Polymère d'isobutylène
Dispersant	Augmenter la dispersion des impuretés insolubles ou des contaminants	

3.4 Préparation du fluide de coupe aqueux

Pour être en adéquation avec les principes de développement durable et surtout pour maintenir la sécurité des travailleurs, les fluides solubles doivent être composés avec précaution en respectant les règles de santé et de sécurité. De plus, pour conserver les performances et l'efficacité, les utilisateurs doivent prendre des mesures en rapport avec la mise en service et le maintien en bonne condition de marche. Celles-ci concernent la préparation des installations, le stockage, la mise en émulsion et le contrôle du fluide en service. (Fuchs, 2020)

3.4.1 Stockage du concentré

Il est conseillé d'entreposer les produits concentrés à l'abri de la chaleur, notamment du soleil. En effet, lors d'exposition à la chaleur, la température de la paroi interne du contenant peut atteindre 70 °C et dégrader certaines propriétés du produit. En outre, du fait de leur teneur importante en eau, plusieurs

concentrés ont tendance à geler à basse température rendant leur utilisation plus difficile, voire impossible. De ce fait et pour conserver la qualité du produit de base, il est impératif de le stocker dans son emballage d'origine, sur des supports évitant le contact direct avec le sol et à l'abri de toute possibilité de gel ou de surchauffe. Par ailleurs, les propriétés principales de stabilité, d'antirouille et autres se trouvent fortement diminuées après six mois de stockage pour les contenants non ouverts et de trois mois pour les emballages entamés. Il est donc recommandé d'assurer une bonne rotation des stocks pour consommer les produits les plus anciens avant les plus récents. (Fuchs, 2020)

3.4.2 Mise en émulsion

L'utilisation d'un mélangeur doseur est nécessaire, car il assure une bonne qualité de l'émulsion et une concentration constante et uniforme réduisant ainsi les principes actifs; ce qui estompe les attaques bactériennes, la corrosion des pièces et des équipements. Le mélangeur limite aussi la manipulation et donc le contact direct avec la peau. La mise en place de cet outil important implique une pression d'eau d'au moins 100 kPa et un manodétendeur qui maintient la pression constante en cas de besoin. Si l'installation ne dispose pas de doseur, la préparation se fera inévitablement de façon manuelle, mais à l'extérieur du réservoir de la machine-outil dans un contenant propre. Il est déconseillé de préparer le mélange aqueux directement dans le réservoir de la machine en y mettant l'eau et ensuite y ajouter le concentré d'huile. En agissant de cette façon, le contrôle de la formation du produit, de son homogénéité et donc de sa qualité globale n'est pas acquis. (Fuchs, 2020)

En outre, la nature et les caractéristiques de l'eau utilisée pour la préparation jouent un rôle. En effet, lorsque la dureté est faible et la température (TH) inférieure à 15 °C, le mélange entretient la formation de mousse. En revanche, une eau trop dure et une TH supérieure à 35 °C encouragent l'encrassement hâtif des installations en réduisant la durée de vie du fluide constitué. Néanmoins, une solution à l'eau trop dure peut être compensée par l'ajout d'un adoucisseur ou bien déminéralisée à l'aide d'un osmoseur. De plus, une eau contenant plus de 250 mg/L de chlorure corrode progressivement des pièces et des machines. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser l'eau de ville plutôt que celle issue de la pluie ou du puisage dont les caractéristiques ne sont pas connues. (Fuchs, 2020)

3.4.3 Préparation des installations avant utilisation du produit

La prise de connaissance des fiches techniques et de données de sécurité est indispensable avant d'entreprendre toute opération avec les produits. Il est recommandé le respect des indications inscrites dans les documents et les étiquettes des emballages accompagnant le produit. Aussi, il n'est pas recommandé d'introduire une charge de solution fraîche dans un circuit contaminé de résidus non solubles

ou des reliquats du fluide précédent. Cette pratique conduit inévitablement à une altération plus rapide de ses caractéristiques. C'est pourquoi il est nécessaire de désinfecter le circuit et de détruire les microorganismes présents dans l'émulsion et sur les parois internes. Pour se faire, un produit de lessive désinfectant adapté (Renoclean SMC plus par exemple) est ajouté à la machine à nettoyer à raison de 2 % du volume. Cette solution de nettoyage est utilisée dans le circuit deux à trois heures avant la vidange. Elle détruit les germes, les microcoqueaux ainsi que les résidus non solubles présents dans le circuit. Ensuite l'eau claire est mise en circulation pour rinçage avant l'introduction du fluide neuf. (Fuchs, 2020)

3.4.4 Contrôle du fluide en service

Il faut suivre le volume du fluide de refroidissement dans la machine, car un volume trop faible peut causer des conséquences sur les opérations et les installations; à savoir : le réchauffage rapide de l'émulsion, la difficulté de filtration, la souillure plus accélérée de l'émulsion, le temps de décantation raccourci de l'émulsion dans la cuve de la machine, la formation de mousse, l'évaporation exagérée. C'est pourquoi il est recommandé d'adopter la règle empirique qui établit que :

$$\begin{array}{c} \text{Volume minimum de liquide aqueux (en L)} \\ = \\ \text{8 fois le débit de la pompe d'arrosage (en L/min)} \end{array}$$

En d'autres termes, si le débit d'arrosage est de 96 L/min par exemple, le volume de liquide aqueux recommandé doit être d'au moins : $8 \times 96 = 768$ L.

De plus, un planning de contrôle périodique de l'état du liquide de coupe doit être établi et suivi, car il permet d'observer et déceler les anomalies à temps et de prendre les mesures correctives au moment opportun. Ce contrôle concerne spécifiquement les éléments suivants : (Fuchs, 2020)

- la concentration : Sur site, un réfractomètre est utilisé à cette fin et donne les informations simples sur la concentration actuelle du mélange. Pour les microémulsions et les synthétiques, le coefficient de correction de chaque produit est appliqué pour étalonner l'appareil. Il est recommandé de laisser reposer l'échantillon dix à douze heures et d'effectuer une seconde mesure pour s'assurer de la fiabilité des résultats;
- la couleur : Elle peut varier en fonction du métal usiné, mais ne donne pas nécessairement des informations sur les modifications chimiques du liquide;

- l'odeur : Chaque composé ayant son odeur propre, un changement d'odeur est donc caractéristique d'un changement dans les propriétés chimiques. Cette anomalie peut conduire au prélèvement et à des analyses complémentaires au laboratoire.

Il est nécessaire de tenir une fiche de suivi contrôle du produit pour chaque machine et sera remplie au fur et à mesure des contrôles successifs planifiés une à trois fois par semaine.

3.5 Brouillards d'huile

Pendant l'usinage des pièces métalliques, des gouttelettes liquides appelées brouillard d'huile sont générées et peuvent rester en suspension dans l'air pendant plusieurs heures. Ces gouttelettes contiennent des polluants qui peuvent provenir des composants de bases des fluides, des produits issus de leur dégradation thermique ou des métaux et alliages usinés. (Wild, 2018) La formation de brouillard est fonction de plusieurs facteurs tels que le type de fluide, la pression d'application, la nature de la buse, la température de la zone de travail, le type d'équipement et la vitesse utilisée, le type de ventilation. Sa composition est faite d'éléments chimiques provenant de l'huile utilisée et des additifs, des particules du métal usiné et des contaminants biologiques comme des bactéries, des cellules et des moisissures. (Duchaine, 2003) D'ailleurs, le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) affirme que « *l'environnement respirable auquel les travailleurs sont exposés, dans ce type de cas, contient des particules de métal, des résidus chimiques, des huiles, des biocides et des contaminants biologiques (toxines bactériennes et produits métaboliques)* ». Pour elle, la limite d'exposition maximale recommandée aux brouillards d'huile par cette organisation est de 0,4 mg/m³ d'air pour un quart de travail de 10 heures à concurrence de 40 h/semaine.

3.6 Risques liés à l'utilisation des liquides de refroidissement des machines

Au cours de leur utilisation, les fluides de coupe se chargent progressivement en copeaux, particules métalliques, boues de rectification, huiles étrangères, voire en bactéries (Guidedechets-gp, 2022). Ils peuvent également se charger en composés chimiques néoformés tels que les HAP. De plus, des aérosols ou brouillards d'huile peuvent résulter de leur utilisation (ANSES, 2017). Spécifiquement, les composés d'huile émulsionnée dans de l'eau additionnée avec des additifs sont une source de nutriments pour les microorganismes qui vivent dans ces fluides aqueux. Cela change les propriétés de ces fluides, notamment le pH, la viscosité et la corrosivité, augmentant les risques pour les hommes et pour l'environnement (Duchaine et coll., 2003). Certaines substances contenues dans les fluides de coupe sont reconnues pour leur toxicité. C'est le cas par exemple de certains composés métalliques comme des dérivés du nickel, du chrome et du cadmium qui sont cancérogènes (ANSES, 2012). En outre, les risques encourus par les

travailleurs sont fonction du type d'huile utilisé, c'est-à-dire une huile entière ou un fluide aqueux. Néanmoins, il est difficile de trouver un fluide de coupe sans danger pour la santé (Caisse d'assurance retraite et de santé au travail [CARSAT], s.d.). D'où la nécessité de les manipuler et d'en faire usage avec plus de précautions.

3.6.1 Facteurs de dangerosité des fluides de coupe

Plusieurs facteurs augmentent sur la dangerosité des fluides de coupe durant leur utilisation.

➤ Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

La présence d'HAP dans les huiles neuves, recyclées ou régénérées peut augmenter sa nocivité. Ainsi, les huiles qui contiennent plus de 3 % d'extrait de diméthylsulfoxyde (DMSO), déterminée suivant la méthode IP 346, présentent un potentiel de dangerosité important. Cette teneur dépend du niveau de raffinage de l'huile de base (Assurance Maladie, 2021; Champmartin, 2012). Cependant, un enrichissement en HAP peut se produire lors de l'utilisation en fonction des conditions thermiques. En effet, le composé peut comporter du benzo(a)pyrène reconnu pour sa cancérogénicité, sa mutagénicité sur les cellules germinales et sa toxicité pour la reproduction (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2012).

➤ Nitrosamines et N-nitrosodiéthanolamine

Lorsqu'il y a conjointement dans la formulation initiale du fluide aqueux, des amines secondaires et des nitrites, il se forme donc des nitrosamines et des N-nitrosodiéthanolamine (NDELA) en particulier lors du stockage ou de l'utilisation de ce dernier. La NDELA est une nitrosamine formée dans des liquides aqueux contenant des additifs anticorrosion nitrés par interaction avec la diéthanolamine et demeure cancérogène. (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2012).

➤ Biocides

Les formaldéhydes, isothiazolinones, phénols, morpholines, éthylènediamine limitent le développement des microorganismes. Leur utilisation a lieu lors de la formulation du mélange aqueux et en post-traitement pendant sa maintenance. Vu leur dangerosité, notamment cancérogènes, les formaldéhydes sont interdits en France depuis le 21 février 2010. Au Canada, l'utilisation des biocides est contrôlée par un cadre réglementaire plus global qui inclut les assainisseurs de surface et les désinfectants. Il comprend le règlement sur les aliments et drogues (RAD) et la loi sur les produits antiparasitaires (LPA). Néanmoins, depuis le 7 mai 2022, Santé Canada a lancé des consultations à propos d'un projet de règlement sur les

biocides en vue de rendre plus spécifique le contrôle règlementaire de ces derniers. (La Gazette du Canada, 2022)

➤ Conditions et fréquence d'utilisation

Les conditions et la fréquence d'utilisation influencent sur les effets des fluides de coupe. En effet, la composition du produit de coupe évolue au cours de son utilisation. Par exemple, si la température d'utilisation dépasse 600 °C pendant l'usinage, la possibilité de formation de HAP est élevée. De plus, la dangerosité des fluides de coupe est aussi liée aux métaux usinés et à la composition des outils utilisés, car ils peuvent engendrer des particules métalliques dans le fluide utilisé. (Assurance Maladie, 2021)

3.6.2 Risques pour la santé

Les fluides de coupe sont composés de nombreuses substances chimiques. Certains produits de décomposition des huiles ainsi que les additifs qu'elles contiennent sont susceptibles de causer des atteintes à la santé (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984). Lors d'expositions prolongées, plusieurs d'entre eux deviennent dangereux et susceptibles de favoriser des affections cutanées et respiratoires. Les principaux canaux d'exposition demeurent l'inhalation de brouillards d'huile et le contact cutané lors de la manipulation des pièces usinées, de nettoyage et entretien des bacs ou par le port de vêtements souillés. En plus, les additifs dangereux sont : l'acide borique et les borates classés toxiques pour la reproduction, les amines secondaires qui peuvent former avec des nitrites ou composés nitrés des nitrosamines classées comme cancérigènes pour l'homme et les biocides libérateurs de formaldéhyde aussi classés cancérigènes. Globalement, les risques sanitaires se situent à quatre niveaux. (Presta, 2021)

➤ Les allergies

Les allergies peuvent être provoquées par les additifs biocides et métaux dissouts (cobalt, chrome, nickel...) ou sous forme de particules provenant des alliages usinés ou des outils.

➤ Les maladies respiratoires

L'inhalation des particules issues des brouillards d'huile peut infiltrer les alvéoles du système respiratoire. L'inhalation d'huile minérale sous forme de particules de moins de 5 µm pourrait aboutir à des réactions fibrotiques dans les voies pulmonaires (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984). Les affections peuvent être l'insuffisance respiratoire, la paraffinose pulmonaire et quelquefois des cas de rhinite et d'asthme causés par l'aldéhyde formique et ses polymères, la présence d'amines aliphatiques, d'éthanolamines ou d'isophoronediamine ou par la présence de cobalt et ses composés. De plus, se développent des pneumopathies d'hypersensibilité causées par des microorganismes foisonnant dans les fluides aqueux. D'ailleurs, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) identifiait en

2009 la pneumopathie d'hypersensibilité, l'asthme, les symptômes d'irritation respiratoire et les altérations de la fonction ventilatoire comme des conséquences de l'exposition aux fluides de coupe sur la santé (Wild, 2018). De même, l'inhalation de brouillards d'huile peut occasionner l'irritation des muqueuses de l'appareil respiratoire supérieur comme c'est le cas pour la pneumonie graisseuse.

➤ Les affections cutanées

Les contacts répétés avec les fluides de coupe sont à l'origine de diverses dermatoses, troubles plus ou moins graves de la peau. Ces contacts se font soit directement au cours des opérations d'usinage, soit indirectement via les vêtements ou les matériels souillés dus au pH élevé et à certains additifs (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984 et Wild, 2018). Les manifestations cutanées les plus fréquentes sont :

- les dermites ou dermatites résultent d'une inflammation non infectieuse de la peau et se présentent suivant deux formes : la dermite de contact et la dermatite allergique. La dermatite de contact est la plus fréquente des maladies cutanées observées chez les travailleurs exposés aux fluides de coupe. Les dermatites allergiques quant à elles sont causées par des additifs anticorrosion comme le triéthanolamine, l'éthylènediamine, le mercaptobenzothiozolate de sodium et le butylphénol. (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984);
- le bouton d'huile ou « oil acne » en anglais est attribué à un ensemble varié de troubles tels que les comédons, la folliculite et les furoncles. Ces lésions sont localisées dans les zones du corps exposées au contact prolongé avec le produit comme les avant-bras, les mains et les cuisses. (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984);
- l'acné chlorique est perceptible à travers les pustules, les papules, les comédons et les kystes à des parties comme les oreilles, le cou, l'abdomen et les organes génitaux. Elle est causée par les additifs d'extrême pression contenant du chloronaphtalène ou des éthers chlorés de diphényle (Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984);
- la mélanose est rare, mais se manifeste par une forte pigmentation autour du point de contact, due à l'irritation ou la réaction inflammatoire causée par une folliculite. Des bactéries engendrent une petite bosse rouge irritante ou douloureuse sur la peau;
- les tumeurs de la peau comme le papillome, le kératome, l'acanthome et l'épithélioma.

En plus des affections, la peau est aussi exposée à des lésions d'origine mécanique. En fait, les copeaux de métaux générés au cours de l'usinage peuvent affecter la peau par pénétration ou écoulement avec des conséquences variables (Wild, 2018).

➤ Les cancers

Les cancers peuvent être liés à la solubilisation des métaux usinés ou des outils de coupe [cobalt, chrome (VI), béryllium, nickel, plomb, cadmium]. Ainsi, selon Wild (2018), plusieurs études montrent que les utilisateurs des fluides de coupes sont exposés à un risque accru de cancer de la vessie parmi les populations. Le tableau 3.2 ci-dessous fait la synthèse des affections possibles en fonction du métal usiné.

Tableau 3.2 : Les affections en fonction des métaux usinés (adapté d'Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, 1984)

Métal usiné	Risques pour la santé	Description
Aluminium	Fibrose pulmonaire Atteintes neurologiques	Composé majoritairement usiné à Verbom Inc.
Béryllium	Fibrose pulmonaire Cancer	Rencontré dans certains alliages de cuivre faiblement alliés ou d'aluminium
Cadmium	Cancer	Rencontré dans certains cuivres faiblement alliés
Chrome	Allergies cutanées et respiratoires Cancer	Composé présent dans les aciers alliés comme les inox et les superalliages
Cobalt et carbure de tungstène	Allergies cutanées et respiratoires Cancer	En tant que produit liant des métaux durs, les aciers et les superalliages Se solubilisent facilement dans les fluides
Fer	Pneumoconiose	Dans les aciers et les fontes
Nickel	Allergies cutanées et respiratoires Cancer	Composé d'addition dans des alliages ferreux, cuivreux, alumineux et superalliages
Plomb et composés	Atteinte du système nerveux central et du sang, Cancer	Présent dans les alliages cuivreux (laitons) et les alliages à bas point de fusion (étain-plomb) Bonne aptitude à se solubiliser
Silicium et silice cristalline	Fibrose Cancer	Le silicium se rencontre dans plusieurs alliages La silice cristalline se trouve dans les céramiques

3.6.3 Risques biologiques

Lors des opérations d'usinage de pièces, notamment le tournage, des aérosols contaminés par les bactéries peuvent être inhalés par les travailleurs. L'utilisation des biocides permet quelquefois de juguler la problématique de la croissance des microorganismes. Selon une étude de l'Université Laval, des concentrations considérables d'espèces bactériennes telles que les *Pseudomonas oleovorans*, *Klebsiella pneumoniae* et *Proteus vulgaris* ont été observées dans les fluides de coupe aqueux. Cette étude avait

trois objectifs: évaluer les niveaux de contamination microbienne à l'intérieur des fluides de coupe de métaux solubles dans trois usines du Québec, établir les caractéristiques physicochimiques des fluides aqueux dans ces usines et enfin, étudier la santé respiratoire des travailleurs. D'autres espèces de bactéries comme le *Staphylococcus aureus*, l'*Escherichia coli* et l'*Enterobacter aerogenes* sont aussi fréquemment détectées. (Duchaine, 2003) La présence de ces bactéries dans les brouillards d'huile respirés par les travailleurs entraîne des maladies respiratoires comme les alvéolites allergiques. Elles favorisent aussi le développement de maladies cutanées comme la folliculite et les dermatites de contact irritatif et allergique. Bien qu'il n'y ait aucune étude à l'échelle canadienne, il est estimé qu'entre 10 % à 30 % des travailleurs sont atteints par ces maladies. (Duchaine et coll., 2003)

3.6.4 Risques environnementaux

La pénétration des huiles usées ainsi que leurs composantes dans l'environnement eau, air et sol, peut se faire par différents scénarios. D'abord, la combustion des huiles usées donne des émissions de substances comme les métaux, des hydrocarbures aromatiques polycycliques et les dioxines. Ces dernières s'adsorbent sur la matière particulaire déposée sur le sol et sur l'eau. Ensuite, le déversement dans les rivières conduit à la formation d'un film à la surface de l'eau. Ce phénomène a pour conséquence, l'augmentation de la demande biochimique en oxygène. De plus, l'oxygène devient plus soluble dans l'huile que dans l'eau et entraîne donc une faible disponibilité en oxygène pour les organismes et le film constitue une barrière physique à la diffusion de l'oxygène à l'interface air/eau interférant ainsi dans le processus d'aération et de photosynthèse. Des changements physiques et chimiques survenus dans le film peuvent libérer des produits de dégradation par la suite. Enfin, le déversement sur le sol entraîne une infiltration par gravité de la fraction hydrosoluble et provoque une contamination des eaux souterraines. (Fellahi, 1998)

Le fluide de coupe sous forme d'huiles entières ou de fluides aqueux doit avoir un impact moindre sur l'environnement : les opérateurs, la machine-outil, la pièce usinée, l'atelier et le milieu naturel (Giroud, 2022). La figure 3.2 lie à l'environnement les différentes phases du travail des métaux comme l'usinage, le traitement thermique, le traitement de surface et la déformation. Les activités concernées dans le cadre de ce travail et marquées en rouges sur cette figure sont la fabrication de produits intermédiaires et accessoirement, le finissage des pièces. Il ressort que les fluides de coupe usés, les brouillards d'huile, les eaux de nettoyage résiduelles et les déchets solides sont des aspects liés à l'usinage des pièces.

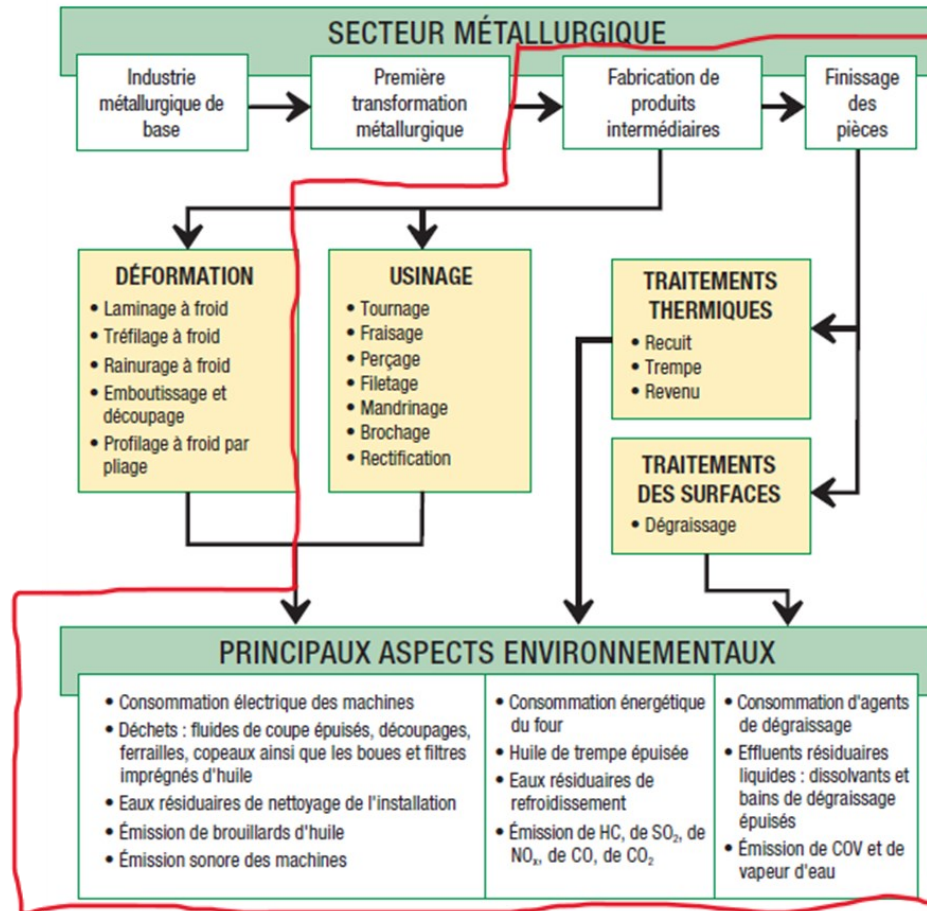


Figure 3.2 : Les aspects environnementaux causés par l'usinage des pièces (tiré de Centre d'activités régionales pour la production propre, 2005)

En effet, la perte des propriétés du fluide de coupe au cours de son utilisation produit des rejets résiduels sous forme d'effluents liquides et de déchets solides. Les émulateurs qu'ils contiennent sont très peu volatils. De ce fait, leur entrée dans l'environnement se fait principalement par les effluents des stations d'épuration ou lors de la décharge directe d'effluents de nettoyage dans les cours d'eau ou pendant l'épandage des boues. De plus, le programme international sur la sécurité chimique soutient que les tensioactifs anioniques alkylbenzènesulfonates linaires, alkylsulfates et oléfinesulfonates se dispersent dans l'environnement essentiellement dans l'eau et les sédiments avec une demi-vie entre deux et dix jours puis de quelques jours chez les espèces aquatiques. Il n'y a donc pas de bioaccumulation. (Lavoué et coll., 2002) En outre, Fendinger et coll. (2002) montrent que l'élimination des émulateurs se fait majoritairement par dégradation biologique soit dans les stations d'épuration, soit dans les cours d'eau. Cette affirmation est soutenue par plusieurs études antérieures menées sur la biodégradation des tensioactifs et liées aux phénomènes de mousse dans certains cours d'eau apparus au cours des années 80.

De plus, les additifs d'extrême pression contiennent généralement des organochlorés toxiques et dommageables pour l'environnement. C'est pourquoi les produits chlorés sont de plus en plus remplacés par des équivalents soufrés et phosphorés moins dangereux. Cependant, ces derniers ne sont pas sans conséquence sur l'environnement. La dynamique actuelle est donc de réduire la teneur en molécule polluante à base de chlore, de phosphore et de soufre dans la synthèse des produits pour fluide de coupe. (Giroud, 2021)

Par ailleurs, le travail des métaux entraîne la diffusion dans l'air de particules microscopiques contaminant ainsi cet environnement de travail. Spécifiquement, la pollution de l'air provenant des fluides de coupe est d'origine bactérienne. Selon une étude menée par Thorne en 1996, les microorganismes de type *Pseudomonas pseudoalcaligenes* et *P. oleovorans* ont été observés dans les échantillons d'air prélevés dans l'environnement d'utilisation des fluides de coupe aqueux. De plus, plusieurs autres espèces bactériennes sont fréquemment retrouvées dans les aérosols de fluides de coupe associés au site d'échantillonnage où elles furent isolées dans l'air.

En somme, les fluides de coupe polluent l'air aussi bien par les particules fines de métaux que par les microorganismes, rendant cet air parfois inapte à la respiration.

3.7 Utilisation des liquides de refroidissement chez Verbom Inc.

À l'unité U1 de VERBOM Inc. à Valcourt, le fluide de coupe utilisé par les machines CNC est le mélange aqueux formé à partir d'huiles de base CIMPULSE 45 MP de CIMCOOL. La fiche technique de ce produit est donnée en annexe 1.

3.7.1 Description de l'huile

Le CIMPULSE est manufacturé par l'entreprise CIMCOOL Industrial Products LLC basée aux États-Unis et distribué au Québec par MILACRON CANADA CORP. en Ontario. Il n'est pas classé comme dangereux pour l'environnement selon la fiche signalétique du produit. Cependant, il provoque l'irritation de la peau et une allergie cutanée. En cas de contact avec les yeux, une irritation sévère peut surgir. Sa composition chimique est détaillée au tableau 3.3 ci-après et ses propriétés physicochimiques sont résumées au tableau 3.4 en dessous.

Tableau 3.3 : Composition chimique du CIMPULSE 45MP (traduit de l'anglais à partir de la fiche signalétique)

Dénomination chimique	Numéro CAS	(% massique)
Distillats naphéniques fortement hydrotraité	64742-52-5	Inf. 25
Hexahydro-1,3,5-tris (2-hydroxyéthyl)-s-triazine	4719-04-4	Inf. 5
Isopropanolamine	78-96-6	Inf. 5
Aryl, dérivés d'alkyle, sels de sodium sulfonés	148520-82-5	Inf. 3
Acide sulfonique de pétrole, sel de sodium	68608-26-4	Inf. 1,5
Autres composants		Inf. 95

Tableau 3.4 : Propriétés physicochimiques du CIMPULSE 45MP (adapté de la fiche d'information produit)

Propriétés	Valeur
État physique	Liquide
Solubilité dans l'eau	100 %
Viscosité à 100 degrés F (37,8 °C)	200 Pa/s
pH du concentré	9,6
pH de l'émulsion à 5 %	8,8
Sulfure (en masse)	Inf. 0,3
Chlore/chlorure (en masse)	Inf. 70 ppm
Apparence	Trouble
Point de fusion et point de congélation	-3,3 °C
Point initial d'ébullition	Sup. 100 °C
Densité	1,020

Pour son utilisation, CIMPULSE 45MP doit être mélangé avec de l'eau. Dans les opérations d'usage, la concentration du produit varie entre 5 % et 15 %. Il est recommandé de toujours ajouter le concentré à l'eau et non le contraire. La solubilité décroît avec la température. C'est-à-dire que pour des basses températures, l'émulsion sera difficile à réaliser.

3.7.2 Description des machines CNC

Les machines à commande numérique concernent toutes les machines de fabrication assistée par ordinateur pour effectuer mécaniquement les mouvements d'outils travaillant sur un objet fixe sur un ou plusieurs axes. En effet, des programmes prédéfinis donnent des instructions pour effectuer avec précision des mouvements, créant ainsi un produit 2D ou 3D. Leur performance permet une productivité et une qualité accrues. Il existe plusieurs types de machines CNC : les fraiseuses, les tours, les perceuses, les rectifieuses, les coupeuses plasma. (Unisontekco, 2018) La machine CNC s'est grandement développée et complexifiée depuis ses débuts dans les années 1950 en s'adaptant notamment aux technologies numériques (Dassault systèmes, 2022).

La machine CNC est composée de plusieurs parties :

- table d'usinage : Elle accueille le matériau à usiner, fixé par un étau, des butées, des pinces ou collé selon les besoins. Elle peut être mobile ou rigide. Lorsqu'elle est mobile, le portique est fixe sur le châssis et la table effectue les déplacements sur l'axe X. Si la table est fixe, c'est donc le portique qui migre dans la direction de l'axe X, parcourant la table;
- broche : C'est l'ensemble formé par le système de fixation de l'outil et le moteur permettant la rotation qui produit l'usinage. Elle porte l'outil d'usinage (foret, fraise, lame, pointe à graver) dont les caractéristiques varient selon le matériau et l'opération à accomplir;
- axes de déplacement : Trois axes (X, Y et Z) assurent le déplacement de l'outil dans l'espace, lui permettant d'effectuer des mouvements longitudinaux, verticaux et transversaux;
- portique : Il sert de base au déplacement du porte-broche suivant l'axe Y;
- porte-broche : Il assure le déplacement de la broche sur l'axe Z.

La figure 3.3 ci-après illustre les différents axes ainsi que les équipements concernés.

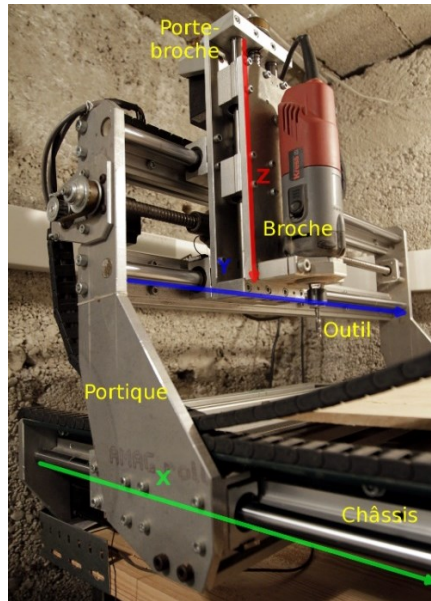


Figure 3.3 : Illustration des équipements d'une CNC simplifiée avec les axes (tiré de Unisontekco, 2018)

Certaines CNC comportent cinq axes de mouvements et plus assurant le déplacement dans une grande variété de directions. Ces machines avancées peuvent disposer de têtes orientables avec des rotations gyroscopiques. Elles permettent ainsi de réaliser des formes complexes.

Ces machines sont opérées à l'aide de programmes développés dans le langage APT (Automatically Programmed Tool Language). Le plus connu des langages de programmation CNC est le code général ou géométrique appelé, G-code. Il permet de contrôler à quel moment, à quel endroit et de quelle manière les machines-outils se déplacent. Le processus d'usinage comprend diverses étapes qui sont (Dassault systèmes, 2022) :

- conception du modèle : Le processus commence par la conception de la pièce assistée par ordinateur (CAO). À la fin de la conception, le rendu est exporté vers la machine CNC dans un format compatible comme STEP ou IGES;
- conversion des fichiers CAO : Les informations contenues dans le fichier de conception (CAO) doivent être extraites, notamment la géométrie des pièces, pour générer un code de programmation compréhensible par la machine CNC. C'est ce dernier qui est chargé par l'opérateur et qui donnera des instructions audibles à la machine lui permettant de produire une pièce donnée;
- configuration de la machine : Il s'agit d'une étape préparative à l'exécution du programme CNC qui apprête l'outil pour son fonctionnement efficace. Elle comprend la fixation de la pièce dans la machine et l'outillage qu'il faut comme les forets et les fraises appropriés;

- exécution : Le programme soumet les instructions à la machine sous forme d'actions et de mouvements à exécuter.

Les matériaux usinés par les machines CNC sont :

- l'aluminium employé pour créer des pièces métalliques et des prototypes sur mesure;
- l'acier inoxydable facilement soudé, usiné et poli;
- l'acier doux, ou acier à faible teneur en carbone intervenant dans la confection de pièces de machines, de modèles et de montages;
- l'acier allié contient d'autres éléments d'alliage en plus du carbone pour améliorer la dureté, la ténacité, la fatigue et la résistance à l'usure;
- l'acier à outils adapté pour les outils de fabrication tels que des matrices, des estampes et des moules;
- le laiton prisé pour des applications à un faible frottement et pour concevoir des pièces d'aspect doré à des fins esthétiques.

Lors de l'usinage dans la machine CNC, les fluides peuvent être appliqués sous forme de vapeur à l'aide de conduit d'air à haute pression ou sous forme de flot continu à travers une buse grâce à une pompe à faible pression. Un système de distribution est généralement utilisé afin de contrôler le volume de fluide de coupe ainsi que la pression avec laquelle il est vaporisé. Le fluide est ensuite récolté par un système gravitationnel, à vitesse ou par des convoyeurs, et envoyé dans des bassins de décantation pour sédimenter les particules contenues dans le fluide souillé (IRSST, 2003).

4. LES OPTIONS DE TRAITEMENT DES LIQUIDES DE REFROIDISSEMENT USAGÉS

Les fluides de coupe aqueux usagés sont constitués en grande partie d'eau dans laquelle se retrouvent, dans des proportions variables, des huiles émulsifiées, des composés organiques dissouts, des matières solides en suspension de même que des sels inorganiques à base de phosphates, de chlorures et de nitrates. De plus les métaux usinés y sont présents soit en solution sous forme de complexes ioniques ou bien sous forme de particules. (Lavoué et Coll., 2002)

Les procédés de traitement diffèrent suivant que le mélange résiduel provient d'une huile entière ou au contraire d'un fluide aqueux; c'est-à-dire une émulsion stabilisée. Les procédés classiques de traitement; à savoir : par décantation, flottaison, centrifugation et autres utilisés pour les huiles entières sont inadaptés pour les fluides aqueux. Ceci s'explique par le fait que d'une part, les gouttelettes d'huiles sont de taille trop petite pour être traitées par décantation. D'autre part, les émulseurs présents dans le mélange empêchent tout assemblage des gouttelettes d'huile à cause de présence d'une barrière électrostatique. (Hamdache, 2012)

Le but des opérations de traitement des matières dangereuses résiduelles est de les rendre inoffensives aussi bien pour la biosphère que pour l'environnement en réduisant les composés organiques en des molécules plus simples et moins dangereuses. Elles comprennent quatre catégories d'opérations : les traitements physicochimiques, les procédés membranaires, la voie thermique et les traitements biologiques. Le choix de l'option de traitement adaptée est fonction de la nature et des caractéristiques de la matière dangereuse résiduelle en présence ainsi que de l'usage prévu à l'issue du traitement (Lussier, 2003). Dans le contexte de cette étude, il s'agit de mettre en œuvre un traitement qui permet de soutirer des solides dissouts, des matières en suspension et des particules grossières d'un rejet liquide en vue de son réemploi. Le tableau 4.1 résume les approches de traitement en fonction de la nature du contaminant cible.

Tableau 4.1 : Types de traitement par nature des contaminants (adapté de Girard, 1997)

Contaminants	Procédés	
Solides dissouts	Adsorption	Échange d'ions Charbon activé Granule
	Réduction organique	Digestion aérobie Digestion anaérobie
	Concentration	Évaporation Cristallisation Cryogénie
	Séparation membranaire	Ultrafiltration (UF) Nanofiltration (NF) Osmose inverse (OI) Électrodialyse et pervaporation
Matières en suspension	Flottation air dissout Décantation/clarification Filtration Séparation membranaire (microfiltration [MF])	
Particules grossières	Épuration par la masse volumique Tamisage selon la forme et la dimension	

4.1 Facteurs de contamination et de dégradation des fluides de coupe

Un fluide de coupe est usagé lorsqu'après utilisation, il devient contaminé, ses propriétés sont détériorées et ne peut donc continuer à accomplir son rôle adéquatement (Nirinaharisoa, 2008). Cette catégorie de liquide résiduel fait partie de la famille des huiles usées selon la classification du règlement sur les matières dangereuses (RMD). La collecte, le transport et le stockage de cette classe de liquide résiduel sont assurés par des structures adaptées détenant une autorisation préalable et doivent intégrer certaines dispositions sécuritaires. Il s'agit de mesures qui visent à protéger l'environnement contre l'infiltration et la pollution accidentelles des sols et des eaux.

En fonction du niveau de contamination et de dégradation, les fluides de coupe se distinguent en huiles noires ou huiles claires. Les huiles noires qui apparaissent avec l'usage des huiles entières d'usinage, de trempe, de laminage et de tréfilage sont fortement contaminées et détériorées. Les huiles claires quant à elles, sont peu contaminées et sont chargées de particules d'eau. (Nirinaharisoa, 2008) C'est le cas des émulsions aqueuses, objets de cette étude.

4.1.1 La dégradation

La dégradation de la qualité de fluides de coupe résulte du phénomène d'oxydation sous l'effet de la température et de l'oxygène de l'air. Les particules métalliques issues des opérations et de l'usure de la tête d'usinage vont jouer un rôle de catalyseur de la réaction d'oxydation. Par le suivi de l'évolution de l'indice d'acide de l'huile de base utilisée dans le temps, la cinétique de la réaction d'oxydation révèle deux grandes phases. D'abord la phase préliminaire où l'oxydation est moins évidente, ensuite, la phase d'oxydation à proprement dit qui montre une croissance rapide du phénomène. La figure 4.1 présente graphiquement son évolution au cours du temps d'utilisation.

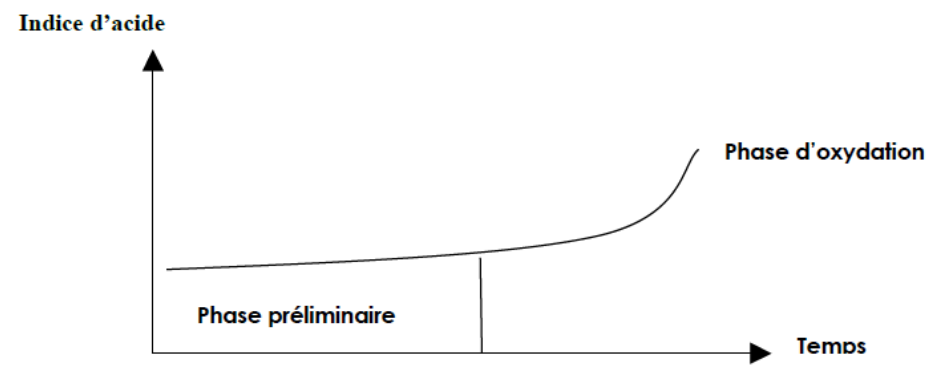


Figure 4.1 : Comportement de l'oxydation au cours du temps d'utilisation (tiré de Nirinaharisoa, 2008)

Il résulte de ce processus, des effets multiples sur la qualité et les performances de la solution, à savoir l'altération des propriétés physiques, la corrosion, la formation de boues, de vernis et de dépôts nuisibles (Nirinaharisoa, 2008).

4.1.2 La contamination

La contamination se produit avec l'ajout des copeaux et des éléments issus de l'usure normale du matériel à la solution initiale. Elle accentue la capacité d'usure graduelle avec la présence dans la solution de particules solides non miscibles indésirées. De plus, les contaminants solubles altèrent également les propriétés physiques du mélange aqueux ou de l'huile entière. Les contaminants les plus fréquents dans le contexte de l'usinage des pièces sont entre autres : les poussières et impuretés atmosphériques, les poussières métalliques, la suie, les sels de plomb issus de la combustion des essences éthylées. (Nirinaharisoa, 2008)

Le traitement proprement dit des solutions usagées débute par une étape préliminaire qualifiée de prétraitement qui consiste à passer le liquide dans un système de séparation par gravité ou d'écumage qui provoque la décantation et la clarification). Le procédé de prétraitement comprend une première

étape de floculation suivie de l'acidification du mélange qui rend les émulsions d'huile instables et donc accroît la coalescence à la surface du liquide. Enfin, l'alcalinisation de ce dernier conduit à la précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes principalement. Cette phase conduit à l'élimination d'une grande partie des contaminants de la solution. (McLaughlin et Zisman, 1998)

4.2 Les traitements physicochimiques

Le traitement physique permet d'assurer la séparation des particules en suspension présentes dans le liquide résiduel par décantation et sédimentation. Il a la caractéristique d'être simple et moins dispendieux tout en séparant les phases liquide et solide. Il peut s'associer à un traitement chimique pour faciliter la précipitation de certains contaminants comme les métaux lourds par exemple. Des substances chimiques sont ajoutées pour former des flocons de matières et permettre ainsi la décantation. Il s'agit dans cas de traitement physicochimique ou primaire. (Lussier, 2003)

Les procédés physicochimiques permettent donc de rompre l'émulsion entre l'huile et l'eau au moyen de réactifs tels que les acides, les sels et les polyélectrolytes, puis d'isoler les phases huileuse et aqueuse par centrifugation, décantation et flottaison. (Hamdache, 2012) En d'autres termes, il s'agit d'ajouter des réactifs à la solution traitée en vue d'ajuster le pH, de la désinfecter, de faire précipiter les particules solides ou de l'oxyder. Le procédé ainsi que les produits utilisés varient selon la nature de la substance résiduelle à traiter. (Mail et coll. 2002)

Une étape importante du procédé de traitement consiste à éliminer les particules de tailles variables classées en quatre catégories. À savoir les particules (1H₂O₃, 2022) :

- dissoutes (< 0,08 µm);
- colloïdales (0,08 – 1 µm);
- supra colloïdales (> 1 – 100 µm);
- décantables (> 100 µm).

Le type de procédé appliqué ainsi que son efficacité du traitement dépendent en partie de la taille des particules présentes dans le fluide à traiter. Par exemple, des particules plus grosses sont faciles à traiter par décantation lamellaire alors que pour celles qui sont plus petites, un filtre à tambour serait adapté. Les méthodes de traitement des liquides usés sont diverses et peuvent être classées en deux catégories : les traitements mécaniques ou prétraitements et les procédés proprement dits. Les opérations mécaniques sont mises en œuvre pour préparer le fluide et les installations.

4.2.1 Traitement mécanique

Aussi appelé prétraitement, le procédé mécanique est mis en œuvre avant le traitement physicochimique pour retenir la portion grossière du mélange. (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales, 2004) Il a pour objectif d'éliminer ces éléments grossiers qui pourraient entraver le processus de traitement ultérieur et endommager les installations. Il peut s'agir de matières volumineuses comme les copeaux de métal issus de l'usinage (dégrillage et tamisage), de sables ou graviers (dessablage) ou encore de graisses (dégraissage et déshuilage). Le dégrillage consiste à faire passer la solution à traiter au travers d'une grille. Le tamisage dont les grilles sont moins espacées peut compléter cette phase. Le dessablage quant à lui se fait par sédimentation. Le fluide s'écoule à faible vitesse dans un bassin appelé dessableur, ce qui entraîne le dépôt des sables et graviers par gravité au fond de l'installation et sont aspirés ensuite par une pompe. Le dégraissage s'effectue par flottaison en injectant de l'air au fond du bassin pour permettre la remontée des corps gras. (Cabinet NPM, 2020)

4.2.2 Traitement physicochimique proprement dit

➤ Traitement primaire

À l'issue du traitement mécanique, la solution résultante est mélangée dans un bassin d'égalisation où elle est brassée vigoureusement afin d'éviter des dépôts de matières décantables et d'assurer l'homogénéité du mélange. La coagulation/floculation est le procédé utilisé pour le traitement des eaux usées comme les fluides de coupe aqueux. Les particules colloïdales et dissoutes sont chargées électronégativement et donc engendrent une répulsion intercolloïdale empêchant une sédimentation naturelle par décantation. La coagulation/floculation contribue à régler ce problème suivant deux mécanismes. D'abord, l'ajout de coagulant pendant une agitation rapide de la solution à traiter annule les répulsions entre les colloïdes et autorise ainsi leur rencontre. Il s'agit de la coagulation. Ensuite, l'adjonction de floculant, cette fois avec une agitation lente du volume, accroît l'agrégation des colloïdes en floc ainsi que leur capacité de sédimentation. Il est dans ce cas question de floculation.

Ce mécanisme est illustré par la figure 4.2 ci-après. (Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets, 1988)

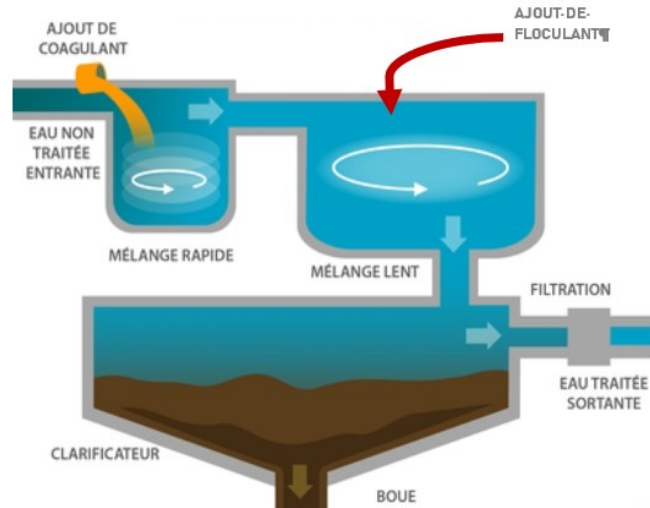


Figure 4.2 : Schéma du traitement par coagulation/floculation (adapté de Sigg et Coll., 2014)

Des coagulants inorganiques sont employés tels que le sulfate d'aluminium $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$, le sulfate de fer $[FeSO_4 \cdot 7H_2O]$, le chlorure de fer ($FeCl_3$) et la chaux ou hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$). De plus, les floccs tant des précipités d'hydroxydes métalliques, leur composition et stabilité sont intimement liées au pH du milieu. Pour connaître le pH idéal pour chaque coagulant, il suffit de se référer au diagramme de solubilité des hydroxydes métalliques correspondant. (Sigg et Coll., 2014) Par exemple, pour le sulfate d'aluminium, le pH optimal est compris entre 6 et 7 selon le diagramme présenté sur la figure 4.3 ci-après.

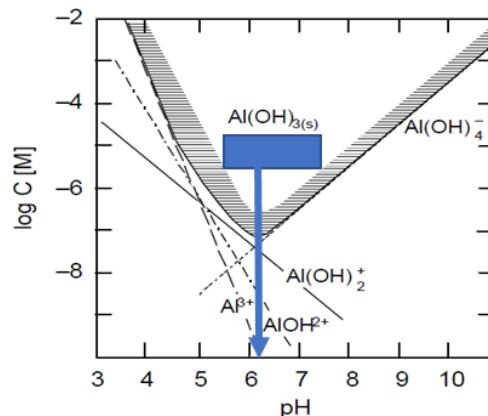


Figure 4.3 : Diagramme de solubilité de l'hydroxyde d'aluminium (adapté de Sigg et Coll., 2014)

Lorsque les fluides contiennent des hydrocarbures ou autres corps non miscibles à l'eau, plusieurs techniques sont possibles (Suez, 2022b):

- le cassage à chaud avec des températures de 65 à 80 °C, un agent de coagulation minéral (Al ou Fe) et par voie d'acide pour un pH de 1 à 2. Après un temps de contact, les huiles sont séparées par décantation naturelle ou par centrifugation. Une finition peut être assurée par flottation à l'air dissout;

- le cassage à froid avec des désémulsifiants organiques. Les résultats obtenus sont semblables à ceux du cassage à chaud, mais celui-ci produit moins de boues et est donc plus économique.

➤ Traitement secondaire

Aussi appelé traitement biologique, le traitement secondaire initié à la suite du procédé primaire s'intéresse à la matière organique dissoute restante. Il a lieu en mode aérobie en injectant d'abord de l'air dans des bassins d'aération pour favoriser la croissance des microorganismes avec la présence de l'oxygène. Ces derniers décomposent alors la matière organique en dioxyde de carbone et en eau avec dépôt de boues par décantation. Au cours de cette étape du traitement, 75 % à 95 % des matières organiques sont éliminés. Par la suite, le mélange traité peut aussi subir des traitements complémentaires ou tertiaires. (Carême, 1999)

➤ Traitements complémentaires ou tertiaires

Les traitements tertiaires sont appliqués lors d'un rejet d'effluents liquides dans un écosystème fragile. Il peut s'agir de la désinfection qui permet d'éliminer les microorganismes pathogènes en y ajoutant du chlore ou de l'ozone. Il y a aussi la déphosphatation qui stimule la précipitation des phosphates excédentaires dans le liquide par ajout de la chaux ou du chlorure de fer. La filtration opérée sur un lit de sable et de charbon peut s'avérer nécessaire pour éliminer certains contaminants chimiques. L'ensemble des étapes de traitement partant de la phase mécanique jusqu'aux traitements complémentaires est illustré par la figure 4.4 dessous.

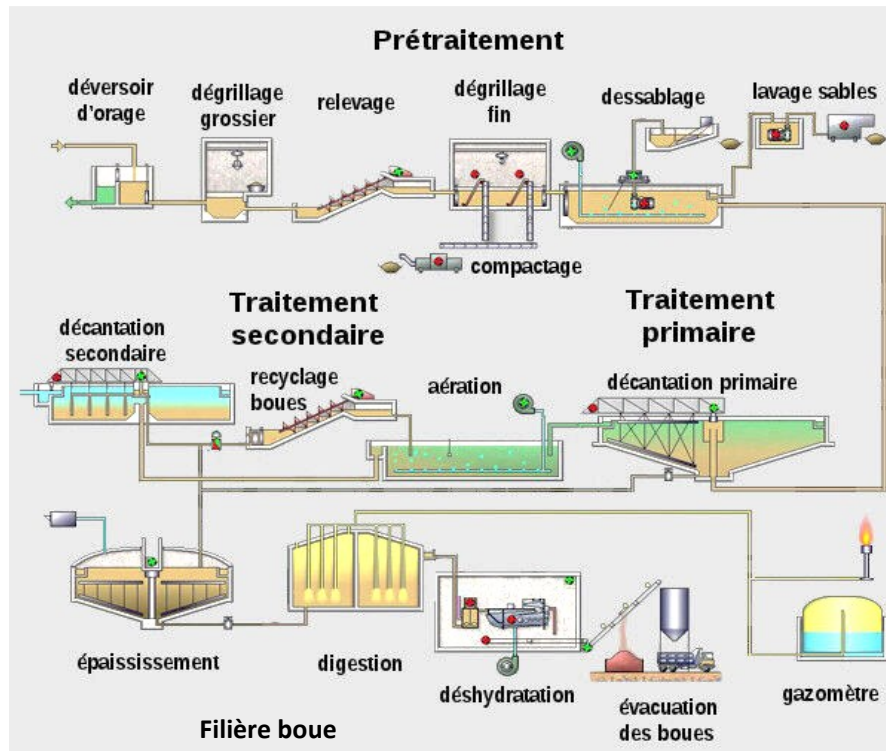


Figure 4.4 : Schéma du processus de traitement physicochimique des eaux usées (tiré de De Laat, 2018)

4.3 Les techniques biologiques

Les traitements biologiques, aussi appelés traitements secondaires, permettent d'éliminer la pollution organique biodégradable de même que les composés de l'azote et du phosphore (Jacquart et Coll., 1993). Elles produisent en général l'élimination des contaminants carbonés et azotés (Cabinet NPM, 2020) et sont devenues une alternative attractive et convenable face aux procédés chimiques conventionnels. Les biotechnologies sont employées dans plusieurs secteurs d'activités comme la production de l'énergie, la valorisation des déchets et la protection de l'environnement. En effet, les bactéries aérobies et anaérobies jouent un rôle indéniable dans la restauration de l'environnement. En plus, l'écosystème naturel encourage la transformation de la matière organique et des polluants en produits peu dangereux comme le méthane et le dioxyde de carbone.

Les activités biologiques peuvent se produire en milieu aérobie ou bien anaérobie. Les microorganismes anaérobies et aérobies sont très diversifiés en termes d'alimentation et de métabolisme avec des réactions biochimiques utiles pour la restauration de l'environnement. En comparaison avec les traitements anaérobies, certaines réactions de biodégradation paraissent plus rapides dans les conditions aérobies. (Fellahi, 1998)

4.3.1 Contamination microbienne des fluides de coupe

Les fluides de coupe aqueux constituent une source nutritive privilégiée pour certains microorganismes. Les études de Dilger (2005), Webster (2005), Veillette (2004), Gorny (2004) et bien d'autres ont mis en évidence cette contamination bactérienne. La croissance bactérienne dans les fluides est une problématique connue qui peut entraîner une perte des qualités intrinsèques des fluides de coupe ainsi que l'accumulation de toxines et d'allergènes. Les origines de la contamination peuvent être liées à l'environnement de travail ou provenir de l'eau utilisée pour la dilution. C'est le cas par exemple des déchets alimentaires, des mégots de cigarettes, de la poussière et des déchets répandus sur le plancher qui encouragent le processus de contamination microbienne. De même, les travailleurs et les biofilms utilisés dans les systèmes de recirculation des fluides peuvent aussi contribuer au processus de contamination. (Marchand et coll., 2010)

Les formes de recyclage des huiles usées par des procédés biologiques couplés ou non à des techniques physicochimiques demeurent l'une des préoccupations des scientifiques depuis les années 90 et connaissent un engouement réel comme outils efficaces et peu coûteux dans l'élimination des contaminants (Fellahi, 1998). Même si les biocides font partie des additifs de la formulation initiale du fluide de coupe, ils peuvent aussi être ajoutés en cours d'utilisation pour assurer le contrôle de la croissance bactérienne dans la solution. Les variants de biocides utilisés sont principalement des molécules hydrosolubles qui libèrent du formaldéhyde. Ces produits insolubles dans l'huile sont plus efficaces contre les bactéries que contre les moisissures. C'est le cas par exemple des marques de biocides Grotan[®], Onyxide 200[®], Busan 1060[®] et Bioban GK[®] qui produisent du formaldéhyde. Cependant, ce dernier est irritant pour les voies respiratoires et peut causer l'asthme. En outre, d'autres biocides relâchant du phénol, du nitrite et des nitrosamines sont utilisés, car plus efficaces contre les moisissures. Le Sodium Omadine[®] et le Dowcide-I[®] sont des exemples de biocides relâchant du phénol alors que le Bioban P-1487[®] et le Bronopol[®] relâchent le nitrite. Les agents antimicrobiens sont sélectionnés en fonction du type de fluide de coupe. Cependant, la température, le pH et le contact avec certains métaux peuvent contribuer à déstabiliser les biocides et influencer la libération des éléments actifs. (Duchaine et Coll., 2003)

Généralement utilisées lors du traitement des effluents et des sols contaminés, les techniques biologiques nécessitent l'usage des microorganismes tels que les bactéries qui agissent comme des décomposeurs des contaminants organiques en présence. Les activités de ces organismes peuvent se faire dans un environnement aéré ou au contraire à l'abri de tout apport d'air. Pour ce faire, l'on doit cultiver ces bactéries et entretenir les conditions de température, de pH et de nutriments adéquats pour leur développement et leurs activités. L'un des inconvénients de cette méthode est qu'elle produit des

quantités de boues dangereuses importantes qui doivent à leur tour être traitées (Lussier, 2003). De plus, la biodégradation partielle peut produire des sous-produits tout aussi toxiques que ceux en cours de traitement (SSPE, 1997). Néanmoins, elles ont pour avantage de demeurer moins coûteuses en comparaison avec les méthodes chimiques.

Aujourd'hui, il existe peu d'études sur la biodégradation des composés organiques de longues chaînes de carbones en général et des huiles de coupe usagées en particulier. La plupart de ces quelques études s'intéressent à la dégradation d'un seul composé alors qu'en réalité, la contamination est produite par un mélange de divers composés chimiques. Cependant, d'autres études démontrent bien que les molécules complexes et toxiques peuvent être dégradées par des microorganismes dans des conditions anaérobies. Parmi ces composés, il y a des hydrocarbures aromatiques, les phénoliques, des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques halogénés. (Fellahi, 1998)

4.3.2 Types de bactéries

Il existe deux grandes familles de bactéries selon leur mode opératoire. Ainsi, elles se distinguent en bactéries aérobies qui opèrent dans un environnement oxygéné et les anaérobies possédant des principes de transformation capables d'utiliser des composés organiques et inorganiques autres que l'oxygène moléculaire comme accepteurs d'électrons. En d'autres termes, ces dernières agissent dans un milieu totalement dépourvu d'oxygène avec des aptitudes dénitrifiantes, réductrices de soufre, méthanogènes et fermentatives.

C'est ce que montre schématiquement Olivier (2015) sur la figure 4.5 ci-après.

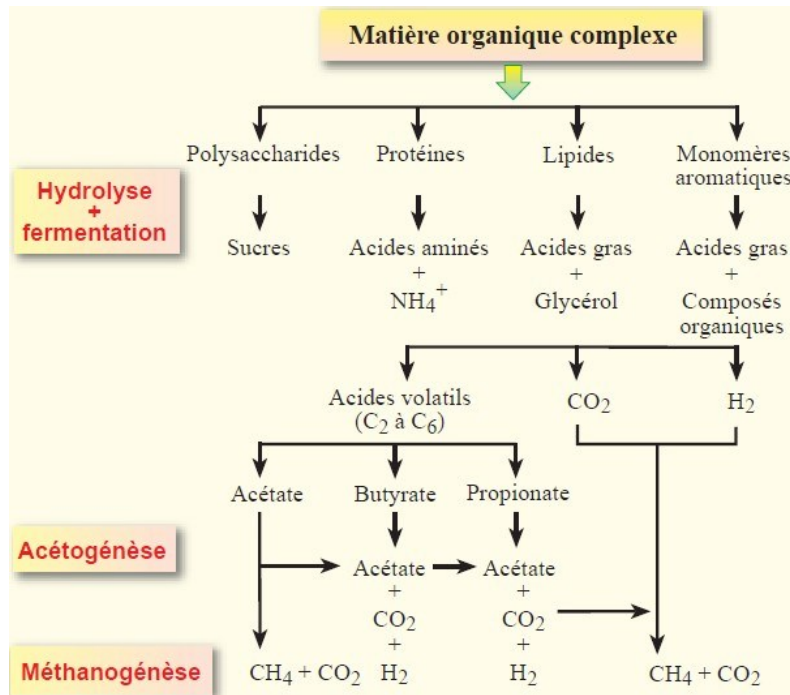


Figure 4.5 : Processus de biodégradation de la matière organique (tiré d'Olivier, 2015)

Selon lui, corroboré par Fellahi (1998), les bactéries qui conduisent les différentes réactions de biodégradation jusqu'à la méthanisation agissent à trois niveaux de la chaîne de transformation. D'abord, les bactéries fermentatives interviennent dans la dégradation de plusieurs matières comme les polysaccharides et les protéines. Elles décomposent également les lipides en produits plus simples tels que les acides acétique et propionique, les acides gras volatils à longue chaîne, les alcools simples, le dioxyde de carbone (CO_2) ou l'hydrogène (H_2). Ensuite, le second groupe est composé des bactéries acétogènes productrices obligatoires d'hydrogène (APOH) qui contribuent à la dégradation de produits issus de l'activité du premier groupe (l'acide propionique, les acides gras volatils à longue chaîne, les alcools) et d'autres produits simples en acide acétique, CO_2 et H_2 . Enfin, le groupe des bactéries méthanogènes qui se subdivise en deux familles. Les méthanogènes hydrogénotrophes utilisent l'hydrogène issu des bactéries APOH pour réduire le dioxyde de carbone en méthane (CH_4) et les bactéries méthanogènes acétoclastes qui elles dissocient l'acide acétique en CO_2 et CH_4 .

4.3.3 Effets de la contamination microbienne

Les souches bactériennes dominantes dans les fluides de coupe aqueux sont généralement semblables à celles qui se retrouvent dans les systèmes d'eau naturelle. La croissance microbienne dans les fluides de coupe en usage affecte diversement leur qualité et leur performance par des changements dans sa viscosité. En plus, il peut en résulter l'acidification de la solution causée par la fermentation avec pour

conséquence, la corrosion des systèmes. De même, les bactéries anaérobies sulforéductrices peuvent produire du sulfure d'hydrogène (H_2S) malodorant et d'autres gaz toxiques. Par ailleurs, elles peuvent causer le colmatage des filtres, buses et conduits et impacter les opérations d'usinage. (Duchaine, 2003) En outre, selon Fellahi (1998), les HAP ont des effets mutagènes sur les bactéries, les rendant de plus en plus résistants aux biocides usuels.

4.3.4 Procédés de traitements

Les procédés de traitement s'améliorent continuellement en efficacité et en capacité. Ces facteurs permettent d'adopter les méthodes biologiques dans le traitement des effluents industriels. Ils vont ainsi permettre d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie des MES.

L'application traditionnelle consiste en l'élimination de la matière organique biodégradable, soluble ou colloïdale, ainsi que l'élimination de composés contenant de l'azote et du phosphore. Parallèlement, la floculation de la biomasse permet de piéger les matières en suspension restant à l'issue du traitement primaire (Elomari et Zarrouk, 2020). C'est l'un des traitements les plus répandus, non seulement dans le cas des eaux usées urbaines, mais aussi en grande partie des eaux industrielles par sa simplicité et son faible coût économique d'exploitation. Ils valorisent la capacité des microorganismes à :

- oxyder la matière minérale, notamment le NH_3 et les matières qui constituent la DCO et la DBO en mode aérobie;
- réduire les molécules comportant de l'oxygène dont le SO_4 et CO_2 en anaérobie.

➤ Mode aérobie

Le traitement aérobie consiste à convertir la matière organique en matériel cellulaire et deux familles de procédés sont utilisées à cette fin, à savoir les lits bactériens et les boues activées. Dans le procédé des lits bactériens, le produit traité s'écoule sur une pile de matériaux en grains ou en fragments sur lesquels se développent les bactéries, en présence d'un contre-courant d'air. Dans le procédé des boues activées, les colonies microbiennes se développent au sein même du liquide à épurer qui doit être constamment agité et surtout abondamment aéré (INP Toulouse, s.d.). L'un des inconvénients de la technologie aérobie réside dans la production d'une grande quantité de boues ainsi que les coûts supplémentaires de gestion de cette boue produite (Fellahi, 1998).

➤ Mode anaérobie

Le mécanisme de traitement anaérobie consiste en la décomposition biologique des effluents fortement chargés. En l'absence d'air et d'oxygène, ces bactéries anaérobies transforment les résidus organiques, d'origine végétale, animale ou chimique, en biogaz (un mélange de méthane CH_4 , CO_2 , N_2 et H_2) réutilisable

comme combustible pour remplacer le gaz naturel ou le mazout. En effet, il convertit environ 90 % de la charge organique en biogaz. (Ressources naturelles Canada, 2020) Elle est souvent employée pour la digestion des boues produites par le système aérobie (Grandjean, s.d.) et est adaptée pour le traitement des composés organiques comme les hydrates de carbone (amidon, sucre, matières cellulosiques), les protéines, les graisses et huiles. Le mode anaérobie produit moins de boue et cette dernière peut être réutilisée comme inoculant dans de nouvelles réactions de biodégradation anaérobie pour le traitement de liquides riches en matières organiques (INP Toulouse, s.d). Elle constitue donc une ressource valorisable. C'est l'exemple d'Agropur au Québec, Canada qui vend les boues sous forme granulaire pour le démarrage et l'ensemencement de procédés anaérobie. Cependant, les études concernant la biodégradation anaérobie sont peu nombreuses du fait des difficultés expérimentales en lien avec la lente croissance des bactéries anaérobies (Fellahi, 1998).

➤ Champignons filamenteux

Les champignons filamenteux appelés « mycélium cultivé » en tant que fermenteurs pour la production de matières organiques présentent des propriétés d'absorption attrayantes pour les métaux. En effet, les parois cellulaires de certains microorganismes tels que les bactéries, les algues, les levures et les champignons filamenteux constituent des capteurs performants pour les cations en solutions aqueuses. Les champignons filamenteux en particulier contiennent une grande part de chitine, de chitosane, de cellulose, de glycane, de polyuronides et des groupements anioniques avec un pouvoir absorbant élevé pour la plupart des cations métalliques. Cette absorption est possible grâce aux radicaux carboxyles, sulfhydryles, phosphates, amines, amides, disponibles dans les parois cellulaires. (Milande et Coll., 1993)

La figure 4.6 dessous présente le processus de traitement par le mycélium. Ainsi, la solution initiale à traiter rejoint l'unité de traitement composée d'un ou plusieurs réacteurs cylindriques contenant les champignons granulés fluidisés par recirculation de la solution de coupe traitée. La fixation des métaux présents dans le fluide de coupe usé a lieu dans ces réacteurs et quand les granulés de mycélium sont saturés en métaux, ils sont désorbés à l'aide d'une solution de régénération qui les concentre dans un volume réduit. Lorsque le but de l'opération est de récupérer les métaux, le mycélium est alors détruit et la solution n'est pas régénérée.

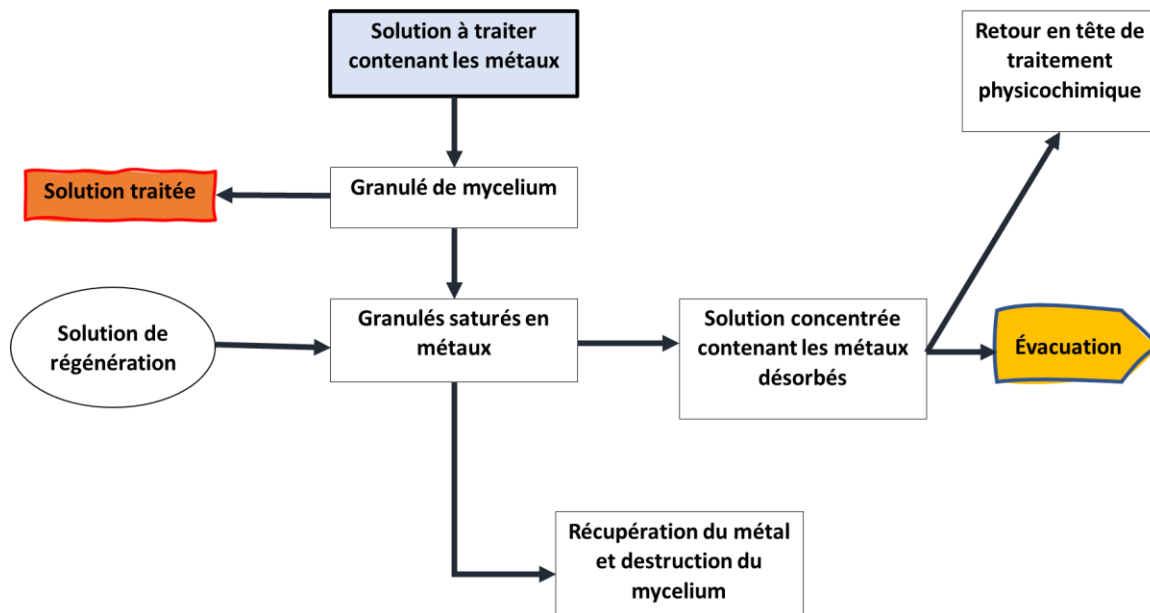


Figure 4.6 : Diagramme du procédé de traitement par champignon filamenteux (adapté de Milande et Coll., 1993)

4.4 Les procédés membranaires

Les procédés de traitement membranaires font partie des techniques physiques de filtration des fluides. Ce sont des techniques de traitement par séparation liquide/liquide, liquide/solide, liquide/gaz ou gaz/gaz qui nécessitent l'intervention d'une membrane semi-perméable et sélective sous l'effet d'une force motrice. Cette force motrice peut être soit un gradient de pression dans le cas de l'osmose inverse (OI), de la nanofiltration (NF), de l'ultrafiltration (UF) et de la microfiltration (MF), ou un gradient de concentration dans le cas de la dialyse ou encore un gradient de potentiel électrique dans le cas de l'électrodialyse. (Romdhane, 2014, Hamdache, 2012 et Girard, 1997) La figure 4.7 dessous situe chacune des techniques de filtration en fonction du diamètre des particules.

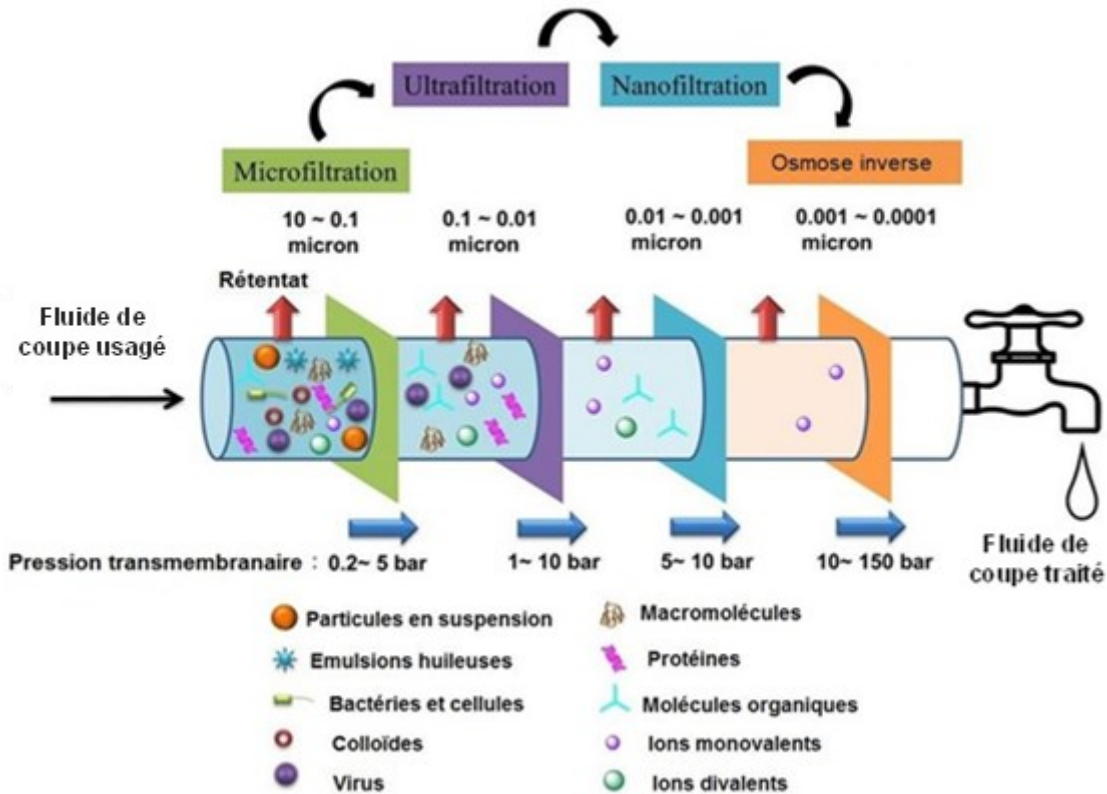


Figure 4.7 : Techniques membranaires en fonction de la taille des particules (tiré d'Ammi Said, 2019)

Cependant, plusieurs techniques de filtration existent en dehors des procédés membranaires. L'un des moyens les plus élémentaires est l'écran métallique à mailles dont la taille des pores varie entre 50 et 500 μm . Il est limité qu'au traitement des particules solides grossières. Il existe aussi les filtres jetables en cartouche ou en rouleau qui retiennent en plus des fractions solides, les huiles insolubles. Cependant, ils constituent une source de pollution supplémentaire. (McLaughlin et Zisman, 1998)

Une membrane se définit comme étant une couche mince qui permet de réguler le passage sélectif de substances dissoutes ou non (Hamdache, 2012). Selon Berland et Juery, une membrane est une succession de strates de matériaux associés possédant une structure asymétrique. Ces matériaux peuvent être de même nature ou différents et reposent sur une couche fine d'environ 50 μm supportés par une couche plus épaisse de 100 μm et plus. En d'autres termes, les techniques séparatives à membranes sont des procédés physiques de séparation qui utilisent les propriétés de tamisage moléculaire d'une membrane poreuse balayée par le liquide contenant les constituants à séparer (Berland et Juery, 2002).

Les méthodes membranaires ont l'avantage de consommer peu d'énergie durant leur fonctionnement et les techniques de séparation ont pour caractéristique principale de mettre en contact des systèmes polyphasés composés du fluide à traiter, de la membrane et du fluide traité. Lors de son fonctionnement,

les systèmes formés sont en état de déséquilibre et vont tendre instinctivement vers un nouvel état d'équilibre. Cette évolution d'état entraîne nécessairement un transfert de matière et d'énergie au niveau de la surface de contact des deux phases. La membrane constitue cette interface entre les deux phases et le transfert de matières entre les phases est fonction de l'intensité de la contrainte appliquée. L'efficacité de la membrane est exprimée en Dalton [Da], l'unité équivalente à des grammes par mole définie par le seuil de coupure qui correspond à la masse molaire d'une macromolécule arrêtée à 90 % ou à 95 % par la membrane selon les conditions opératoires données par le fournisseur (Déon et Fievet, 2017).

4.4.1 Structure des membranes

Les membranes sont généralement fabriquées à partir d'un polymère synthétique. Cependant, il existe des membranes faites en céramique ou métalliques. En fonction de leur structure, les membranes se distinguent en trois types :

- les membranes isotropes qui ont des propriétés constantes sur toute leur épaisseur;
- les membranes anisotropes avec une structure composite variant de la surface de la membrane vers l'intérieur;
- les membranes liquides.

De même, suivant les matériaux constitutifs, les membranes peuvent se distinguer en membranes organiques à base de polymères, membranes minérales ou inorganiques, membranes composites et les membranes échangeuses d'ions. (Ammi Said, 2019)

4.4.2 Géométrie des systèmes membranaires

Les membranes sont construites de façon dense pour assurer une grande surface de contact avec le liquide traité et minimiser les coûts d'investissement. Pour ce faire, différents assemblages et formes sont constitués dont les plus fréquents sont les systèmes tubulaires, plans et spiraux. (Ammi Said, 2019)

➤ Membranes tubulaires

Les membranes tubulaires, telles qu'illustrées par la figure 4.8, comprennent des tubes cylindriques creux conditionnés dans des tubes de support plus grands. Ils sont utilisés pour le traitement des eaux usées à cause de la densité importante des débris qu'ils peuvent filtrer, mais aussi de la facilité de nettoyage. (Ammi Said, 2019)

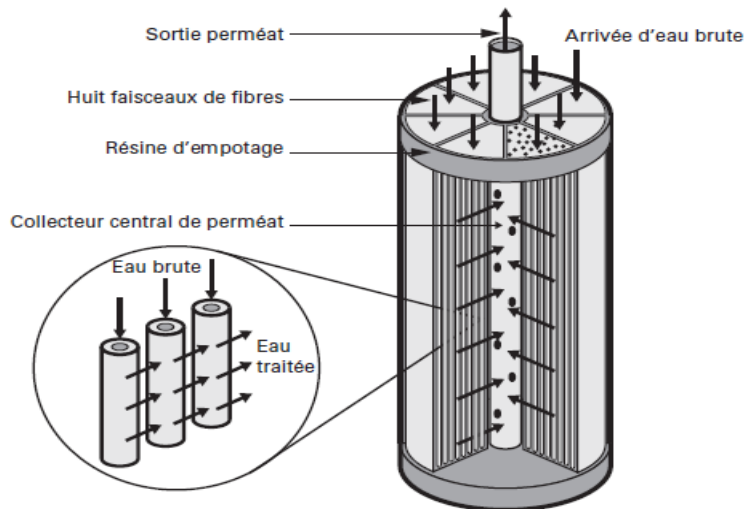


Figure 4.8 : Schéma de système à membrane tubulaire (tiré de Suez, 2022)

➤ Membranes à spirale

Les systèmes à spirale sont généralement employés pour filtrer l'eau de mer, l'eau douce et les produits laitiers. Ils offrent une plus grande surface de filtration et ont une grande efficacité. La membrane est formée dans une fourrure plate qui s'enroule en spirale et l'ensemble est contenu dans un cylindre à haute pression (Ammi Said, 2019). La figure 4.9 donne la représentation schématique de ce système. L'alimentation en liquide usagé se fait le long de la surface externe de la fourrure à membrane et s'infiltre à travers celle-ci en y déposant les contaminants.

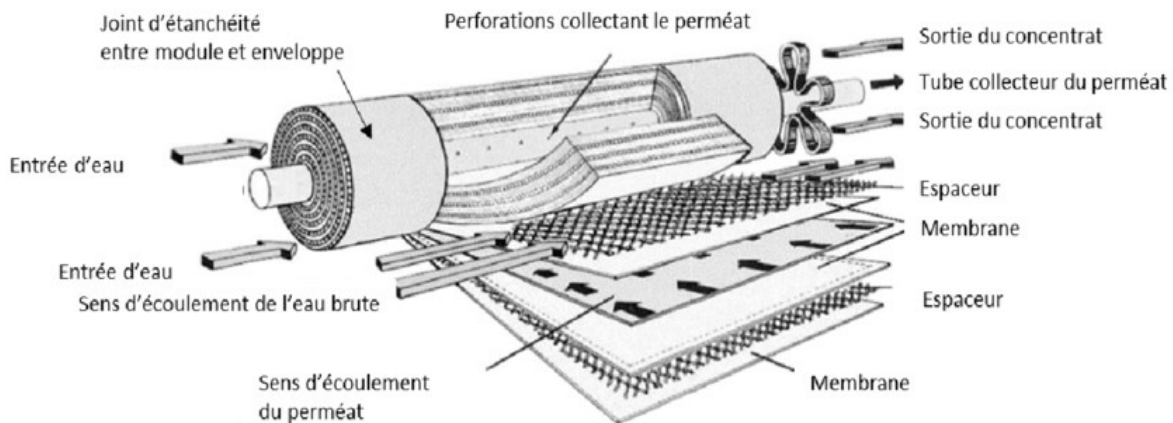


Figure 4.9 : Représentation schématique d'un module membranaire spiralé (tiré de Qasim et coll., 2019)

➤ Membranes à feuilles plates

Les membranes à feuilles plates sont des systèmes de filtration à couche unique. Elles peuvent être empilées avec différentes couches de tailles de pores variables, faites à base de céramiques complexes, de carbures de silicium, de matériaux organiques simples ou de polymères. Elles sont adéquates pour la filtration de l'air et des eaux industrielles. Un exemple de système membranaire à feuilles plates est donné sur la figure 4.10.

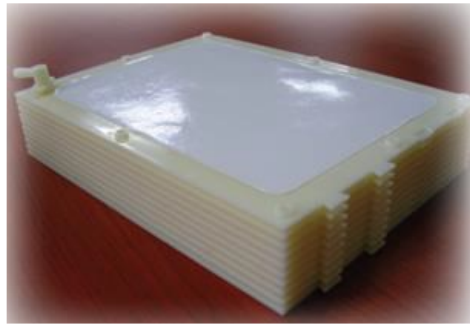


Figure 4.10 : Empilement membranaire à feuilles plates (tiré d'Ammi Said, 2019)

4.4.3 Description du processus de filtration par la membrane

Dans le système membranaire, le fluide passe d'un milieu contaminé appelé rétentat vers un milieu décontaminé nommé perméat par l'intermédiaire d'une membrane. La ségrégation se produit du fait de la différence de pression exercée des deux côtés de la membrane et qui permet de maintenir les contaminants d'un côté et le fluide purifié de l'autre. (Ammi Said, 2019). La figure 4.11 dessous résume ce principe.

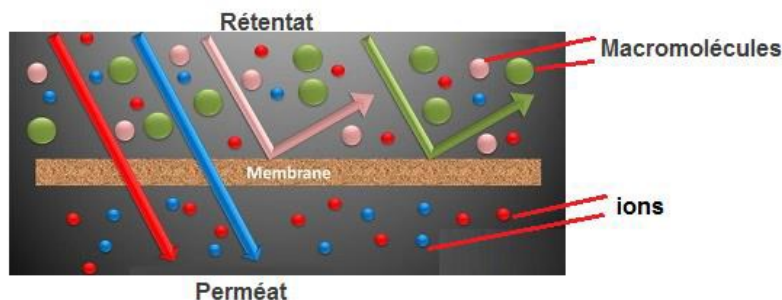


Figure 4.11 : Principe de fonctionnement du procédé membranaire (tiré d'Ammi Said, 2019)

Il existe deux modes de fonctionnement des systèmes membranaires mettant en jeu un gradient de pression; à savoir la méthode tangentielle ou cross-flow et la filtration frontale ou dead-end (Ammid Said, 2019), illustrée sur la figure 4.12 ci-dessous. En fonction des contraintes y compris la composition du fluide à traiter et des exigences imposées, l'une ou l'autre de ces deux modes est adoptée (Sofise, 2019).

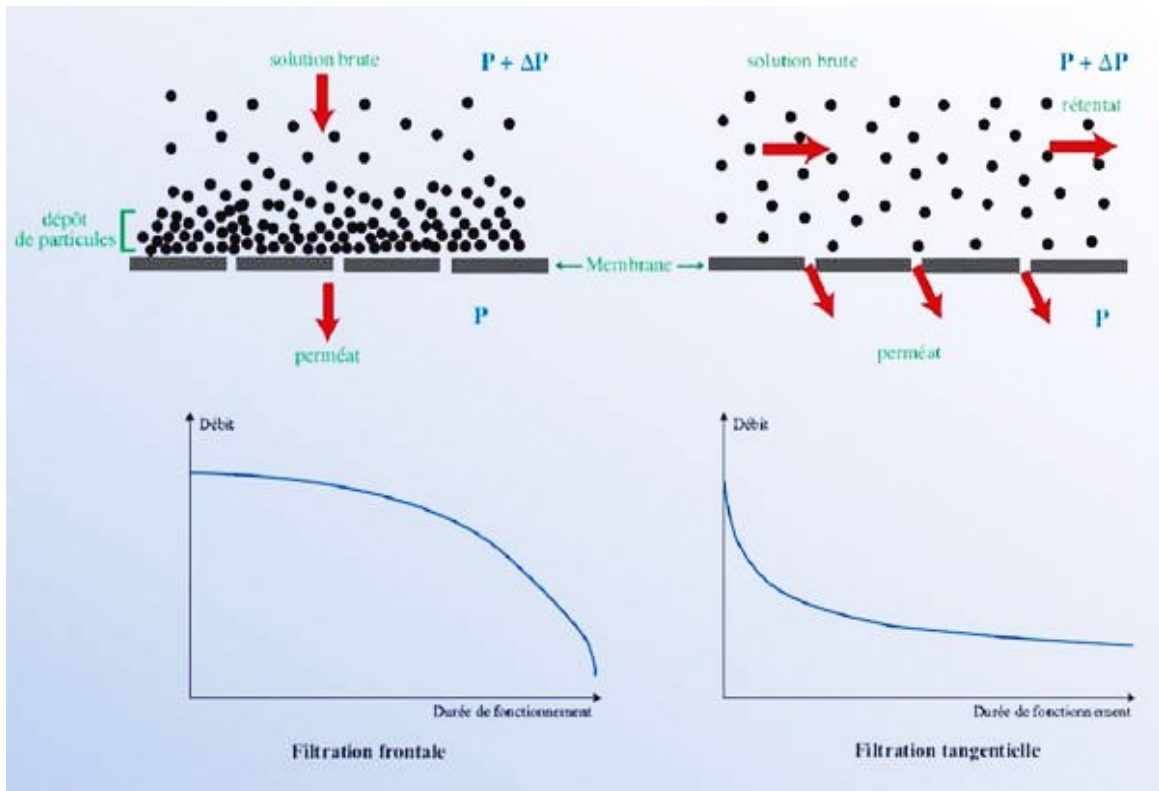


Figure 4.12 : Modes de fonctionnement des systèmes membranaires (tiré de Matevi, 2022)

➤ La filtration frontale

La filtration frontale dite filtration conventionnelle consiste à alimenter la surface de filtration avec le fluide à traiter de façon perpendiculaire. C'est le cas par exemple des filtres à café ou les particules entrant dans le module de filtration sont retenues par le filtre. C'est un procédé simple et peu onéreux, car les coûts d'investissement initial ainsi que les dépenses énergétiques de fonctionnement sont faibles comparés à la filtration tangentielle.

Cependant, son inconvénient est que les particules s'accumulent progressivement à la surface du filtre, colmatant ainsi les pores avec pour conséquence majeure, la réduction de débit de traitement, le flux de perméat voire le bouchon total des pores. En outre, il n'atteint jamais un état stationnaire, car il nécessite un suivi constant de nettoyage et remplacement des filtres. En cas de filtration d'un fluide contenant une grande quantité de particules à éliminer, il peut se produire l'encrassement et les pertes de charge importantes qui rendent la méthode frontale non efficace. C'est pourquoi elle est adaptée pour les solutions peu chargées en particules. (Sofise, 2019)

➤ La filtration tangentielle

La filtration tangentielle fait passer le courant d'alimentation de façon parallèle à la surface de la membrane. Elle permet le contrôle du colmatage à la surface de la membrane; ce qui assure la stabilité du flux et prolonge la durée des membranes (Ammid Said, 2019). En effet, le cisaillement engendré par la circulation tangentielle du fluide empêche les dépôts de particules sur la surface de la membrane. Le colmatage et la résistance à l'écoulement sont réduits (Sofise, 2019). Le perméat traverse la membrane sous l'effet de la pression et les particules les plus grosses se concentrent dans le rétentat tel qu'illustré sur la figure 4.13 dessous.

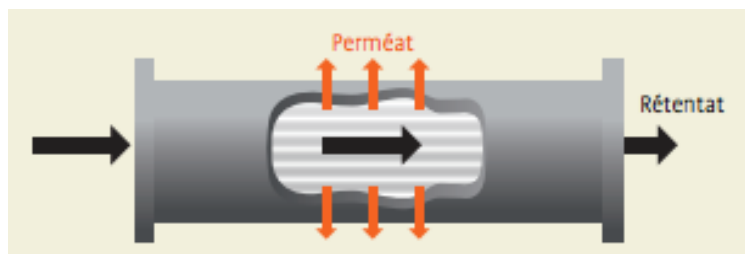


Figure 4.13 : Fonctionnement de la filtration tangentielle (tiré de Sofise, 2019)

Elle peut être mise en œuvre pour les fluides fortement chargés en particules avec un seuil de coupure bas et assure une qualité de filtration constante durant toute l'opération. Lorsque le processus consiste à éliminer les particules les plus petites de la solution, l'accent est mis sur le rétentat qui est resté en amont de la membrane. Si au contraire le but est de traiter les particules les plus grandes, comme c'est le cas pour les fluides de coupe usagés, le perméat passé à travers la membrane est donc la solution qui intéresse le traitant. Dans certains cas, les deux fractions de liquide sont valorisées séparément selon les intérêts industriels. En somme, la filtration tangentielle est recommandée pour les opérations de recyclage et de dépollution, notamment le traitement des effluents et la potabilisation de l'eau. (Sofise, 2019)

4.4.4 Classification des membranes

Les membranes peuvent être regroupées en deux catégories en fonction de la structure membranaire; à savoir les membranes microporeuses ou symétriques et les membranes asymétriques. Suivant la nature physicochimique, c'est-à-dire la composition chimique, la stabilité physique, chimique et thermique, elles se distinguent en trois classes principales (Ambroise, 2004) :

- les membranes organiques (naturelles ou synthétiques) : Les membranes organiques sont faites pour l'essentiel de polymères de cellulose (acétate, ester...) très hydrophobes avec une perméabilité importante ainsi que des coûts de fabrication faible. Cependant, leurs inconvénients sont une température maximum de service qui ne doit pas excéder 40 °C ainsi qu'une tolérance limitée à l'acidité

d'un environnement à pH compris entre 3 et 6. De plus, elles sont biodégradables, ce qui les rend fragiles aux attaques microbiennes. Les membranes organiques à base de polymères synthétiques tels que le nylon et le polysulfone présentent beaucoup d'avantages par rapport aux précédentes;

- Les membranes minérales (inorganiques ou céramiques) : Les membranes minérales présentent de nombreux avantages par rapport aux membranes organiques, car elles ont une très bonne résistance chimique, mécanique et thermique. Elles sont le plus souvent disponibles sous forme tubulaire;
- les membranes composites : Les membranes composites sont composées d'une peau dense en polymère posée sur une autre partie microporeuse. À l'origine, ces membranes ont été développées pour la nanofiltration et l'osmose inverse.

Cependant, diverses autres classifications existent suivant différents points de vue. Ainsi :

- selon le mécanisme de séparation, les membranes poreuses, les membranes denses et celles d'échange d'ions peuvent être identifiées;
- selon la nature, elles se distinguent en membranes biologiques ou en synthétiques. Les synthétiques se composent des membranes symétriques ou isotropes et des asymétriques ou anisotropes comme détaillé sur la figure 4.14 dessous.

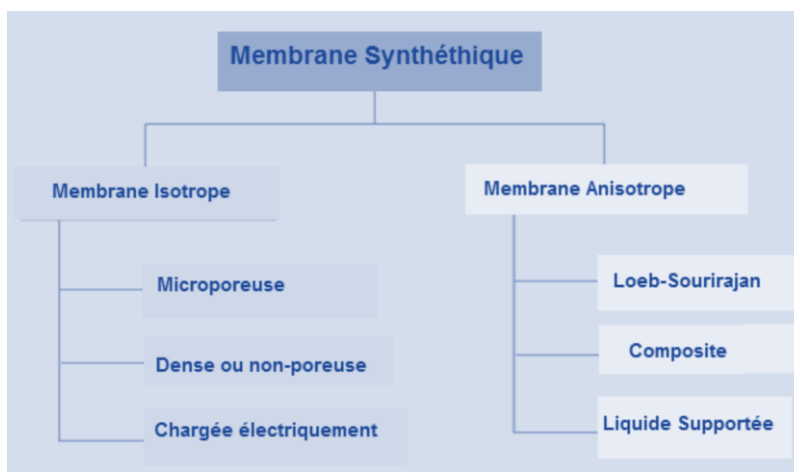


Figure 4.14 : Classification des membranes synthétiques (adapté d'Ammi Said, 2019)

En fonction du type de matériau utilisé, la membrane présente des avantages et des inconvénients comme synthétisés dans le tableau 4.2 ci-après.

Tableau 4.2 : Avantages et inconvénients des matériaux des membranes (tiré de Romdhane, 2014)

Matériaux	Avantages	Inconvénients
Acétate de cellulose	Perméabilité élevée Sélectivité élevée Mise en œuvre assez aisée Adsorption des protéines faible => colmatage moindre	Sensible à la température (T<30-40 °C) Sensible au pH (entre 3 et 8) Sensible au chlore Sensible au compactage Sensible aux microorganismes
Polyamide	Bonne stabilité chimique, thermique et mécanique.	Grande sensibilité au chlore Faible perméabilité Phénomènes d'adsorption importants
Polyéther sulfoné	Bonne stabilité thermique (jusqu'à 80 °C) et au pH (de 2 à 12) Résistance au chlore	Sensible à l'adsorption des protéines et des matières organiques naturelles
Acryliques	Bonne stabilité thermique et chimique Stockage à sec possible	Faible résistance mécanique
Matériaux fluorés (PTFE, PVDF)	Bonne stabilité thermique (80 °C) et chimique (0<pH<14) Tolérance vis-à-vis de la plupart des solvants	Microfiltration uniquement
Céramiques	Résistance aux températures élevées (jusqu'à 300 °C) Résistance aux conditions agressives et solvants (pH entre 0 et 14) Possibilité de stérilisation à la vapeur d'eau et aux solvants	Seuil de coupure minimum ≥ 1000 Da Coût élevé N'existe qu'en géométrie tubulaire ou plane.

4.4.5 Techniques de séparation membranaires

Les techniques membranaires visent à séparer les constituants par tamisage moléculaire et comprennent la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI). La sélection des composés retenus se fait sur une base stérique, c'est-à-dire en fonction de la taille des molécules qui composent le mélange traité puis d'effets d'interaction électrostatique en cas d'utilisation de membranes avec de petites tailles de pores (Arzate, 2008). Elles font objet de nombreuses études et recherches visant à améliorer leurs performances et promouvoir leur application (Mercier-Bouchard, 2017). La principale force motrice lors des opérations de filtration membranaire est le gradient de pression en comparaison au gradient de température comme force motrice pour la distillation membranaire (Jantaporn, 2016). Le tableau 4.3 ci-après précise les valeurs de forces motrices, les substances retenues et celles qui traversent la membrane en fonction du type de filtration appliqué.

Tableau 4.3 : Récapitulatif des forces motrices et répartition des substances en fonction du type de filtration (tiré de Jantaporn, 2016)

Procédés	Force motrice	Substances qui traversent la membrane	Substances retenues
Microfiltration (MF)	Différence de pression 10-50 kPa	Solvant (eau) et Solutés dissouts	Matières solides en suspension, particules fines et certains colloïdes
Ultrafiltration (UF)	Différence de pression 100-800 kPa	Solvant (eau) et Solutés basse masse moléculaire (<1000 Da)	Macrosolutés et colloïdes
Nanofiltration (NF)	Différence de pression 0,3-3 MPa	Solvant (eau), Soluté de faible masse moléculaire et ions monovalents	Composés de masse moléculaire >200 Da et ions multivalents
Osmose inverse (OI)	Différence de pression 1-10 MPa	Solvant (eau)	Solides dissouts et en suspension

➤ L'osmose inverse

L'osmose inverse est la plus ancienne des techniques de séparation par membrane (Romdhane, 2014). Le phénomène d'osmose consiste à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Il est courant dans le fonctionnement des membranes cellulaires. La membrane laisse passer le solvant et retient le soluté. La différence de concentration crée une pression osmotique. Cette pression est créée par l'absence de mouvement de flux à travers la membrane. Pour inverser le passage du solvant, une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée. (Berland et Juery, 2002) Le principe de l'osmose inverse est illustré par la figure 4.15 ci-après. Elle indique qu'en phase d'osmose, le transfert de fluide se fait de la solution la moins concentrée A vers la plus concentrée B sous l'effet de la pression osmotique jusqu'à atteindre l'équilibre. Mais en osmose inverse, lorsqu'une pression mécanique supérieure à la pression osmotique est appliquée sur la solution la plus concentrée B, le transfert se fait maintenant de B vers A à travers la membrane d'osmose inverse.

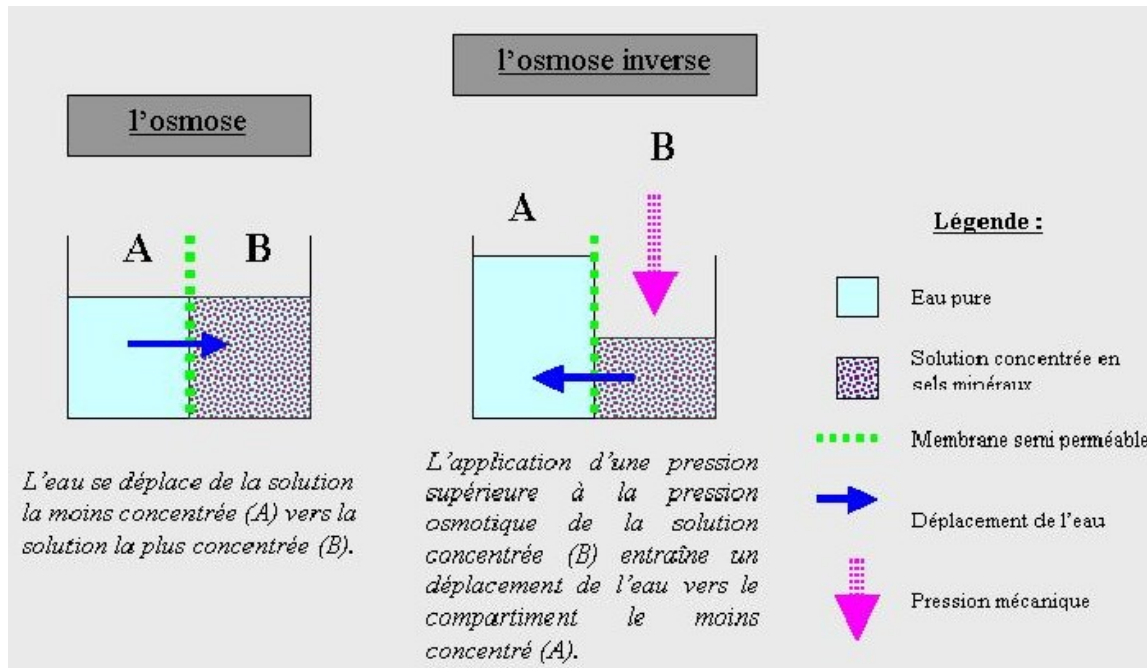


Figure 4.15 : Principe de l'osmose inverse (tiré de KUNTZ, 2012)

Selon Berland et Juery, lorsque la concentration est élevée, la pression osmotique est importante et la masse molaire est faible. L'osmose inverse utilise des membranes denses à la différence de la microfiltration et de l'ultrafiltration. Ce qui signifie que le processus de séparation des solutés se fait en fonction de leur affinité avec la phase membranaire et non sur la base de la taille des pores (Déon et Fievet, 2017). Elle est adaptée pour le dessalement des eaux de mer et saumâtres, l'élimination des pesticides et herbicides, la production d'eau ultra pure et d'eau de procédé (Berland et Juery, 2002; Déon et Fievet, 2017). Le transfert de matières à travers une membrane d'osmose inverse se fait par solubilisation du soluté dans la membrane, suivi de sa diffusion à travers cette dernière pour rejoindre le perméat. Tel qu'indiqué dans le tableau 4.4, les pressions intermembranaires requises sont élevées, pouvant atteindre 10 MPa. L'osmose inverse est adaptée pour filtrer les solutions contenant des substances de faible masse molaire avec pour but de retenir la totalité des solutés. (Déon et Fievet, 2017)

➤ La nanofiltration

En nanofiltration, il existe des mécanismes de sélection ou d'exclusion autres que stériques. De ce fait, des espèces peuvent être retenues dans le système bien avant que les critères de tailles ne soient considérés. En effet, les membranes acquièrent une charge électrique de surface lorsqu'elles sont en contact avec une solution aqueuse. La nanofiltration est l'un des procédés de séparation en phase liquide les plus avancés. Elle utilise des membranes organiques dont les pores varient entre 0,5 et 2 nm. Elle se situe entre l'osmose

inverse et l'ultrafiltration. Les ions monovalents et les molécules de masse molaire inférieure à 200 g/mol ne sont en général pas retenus par ce type de membrane. En revanche, les ions multivalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} et Al^{3+}) et les molécules de masse molaire supérieure à 200 g/mol (sucres, colorants) sont retenus.

Cette sélection entre ions mono et multivalents s'explique par ce que les membranes nanofiltrantes sont élaborées généralement à partir de matériaux qui possèdent des groupements fonctionnels ionisables en surface; principalement le groupe carboxylique (-COOH), le groupe sulfonique (-SO₃H), phénolique (φ-OH) et le groupe amine (-NH₂). Ces groupements confèrent des propriétés acides ou basiques qui conduisent les membranes à acquérir une charge de surface lorsqu'elles sont en contact avec la solution aqueuse. Cette charge de surface peut aussi provenir des propriétés amphotères (c'est-à-dire présentant à la fois le caractère acide et basique) du groupement hydroxyle (-OH) présent à la surface des oxydes métalliques qui constituent les membranes céramiques. (Déon et Fievet, 2017)

Les matériaux utilisés pour les membranes de nanofiltration doivent résister aux contraintes mécaniques, chimiques et thermiques en lien avec le liquide traité et les procédés. Les membranes polymères organiques ont pour avantages d'être disponibles, faciles à mettre en œuvre et au coût de production peu élevé. Néanmoins, ils ont une faible résistance chimique thermique et mécanique en comparaison aux membranes inorganiques. Le tableau 4.4 présente les principaux polymères utilisés en nanofiltration avec leurs conditions d'utilisation en pH et température.

Tableau 4.4 : Matériaux nanomembranaires et gammes d'utilisation en pH et température (tiré de Déon et Fievet, 2017)

Matériau (couche active)	Tenue en pH	Tenue en température (°C)
Polyéther amine	2 à 10	45
Polyéther sulfone	1 à 14	110
Acétate de cellulose	2 à 9	35
Polyamide	2 à 12	80
Polysulfone	1,5 à 12	80

Les membranes inorganiques sont plus récentes et se composent de céramiques comme l'alumine (Al_2O_3), le dioxyde de titane (TiO_2) et le dioxyde de zirconium (ZrO_2). Elles ont une grande résistance chimique qui les rend adaptées à la filtration des solvants organiques et des solutions agressives comme les acides, les basiques, les oxydantes et autres. Elles présentent aussi de bonnes résistances thermiques avec des

températures d'opération atteignant des centaines de degrés Celsius. En plus, elles supportent des pressions d'opération élevées pouvant atteindre 10 000 kPa. Cependant, elles sont fragiles et peu disponibles pour les pores de faibles tailles. De plus, il n'en existe pas de modèle spiralé à cause de sa rigidité et les couts sont plus élevés que les membranes polymères. À titre indicatif, une unité de filtration à membranes céramiques coute entre 2 000 et 7 500 €/m² quand la membrane organique s'obtient de 300 à 750 €/m². Néanmoins, les dépenses d'investissement initial ne sont pas les seuls facteurs influençant le choix d'un type de membrane. D'autres critères comme les couts additionnels liés au nettoyage régulier des membranes ainsi que les couts de renouvellement doivent être considérés.

➤ L'ultrafiltration

À l'inverse de la nanofiltration et de l'osmose inverse, l'ultrafiltration effectue les opérations de filtration à faible pression transmembranaire (Romdhane, 2014). Elle est utilisée dans diverses industries mettant en œuvre des procédés de séparation liquide/solide ou liquide/liquide et s'est développée depuis les années 80. Elle utilise les membranes microporeuses de diamètre de pores variant entre 1 et 100 nm et de seuil de coupure de l'ordre de 20 kDa avec des pressions opérationnelles de 1 à 10 bars (100 à 1000 kPa). Les petites molécules telles que l'eau et les sels passent à travers les membranes, mais celles dont les masses molaires sont plus élevées comme les polymères, les protéines et les colloïdes sont retenues. La figure 4.16 ci-dessous présente le principe de fonctionnement du système ultra membranaire où les macromolécules sont récupérées en amont de la membrane dans le rétentat tandis que les petites molécules qui passent à travers la membrane sont recueillies dans le perméat. Cette technique est adaptée pour le traitement des macrosolutés dans les effluents industriels ou dans l'eau à usage domestique ou médical. (Berland et Juery, 2002; Merier-Bouchard, 2017)

Le mécanisme de ségrégation des molécules tient compte de l'effet stérique, mais pour les espèces chargées, les interactions électrostatiques avec la membrane, elle-même chargée, sont également prises en considération. Plusieurs applications existent dans les domaines de l'eau, l'industrie et l'environnement dont (Siva, 2022 et Déon et Fievet, 2017) :

- le recyclage de bains de dégraissage et de fluide de coupe, objet de cette étude;
- le traitement des rejets industriels seul ou en couplage avec un bioréacteur;
- la potabilisation de l'eau;
- l'abattement DCO/DBO;
- la concentration/séparation de solutions macromoléculaires (concentration des protéines du lactosérum;

- la standardisation protéique du lait;
- l'élimination de macrosolutés présents dans les effluents industriels;
- le traitement de bains de peinture par électrophorèse;
- la récupération de cations métalliques par UF assistée par complexation ou par micellisation; la clarification de moûts de fermentation pour extraire des molécules actives pharmaceutiques.

Les systèmes d'ultrafiltration existent dans de grandes variétés de matériaux et de géométries comme les modules tubulaires, plans, spiralés et à fibres creuses (Arzate, 2008).

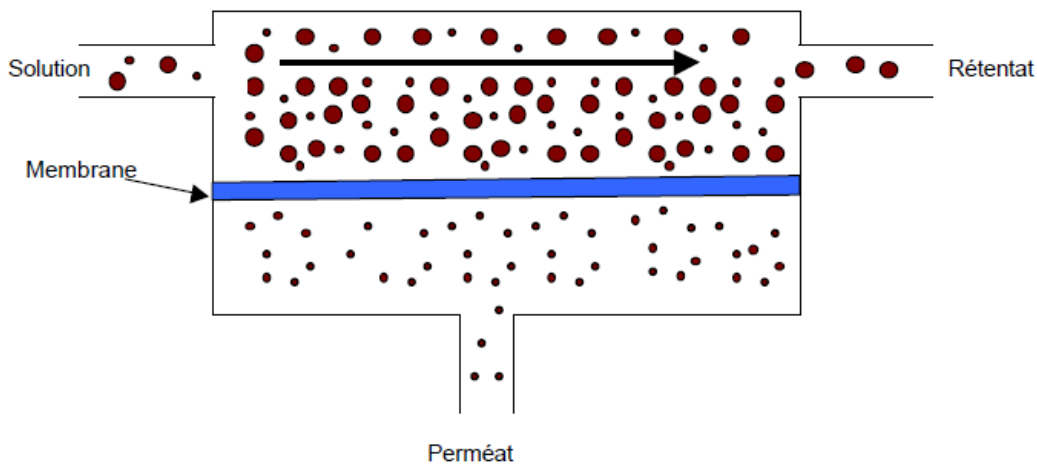


Figure 4.16 : Fonctionnement du système de membrane d'ultrafiltration (tiré de Berland et Juery, 2002; Mercier-Bouchard, 2017)

➤ La microfiltration

La microfiltration est le processus de rétention le moins sélectif avec des pores allant de 0,05 à 2 μm et des pressions d'opération comprises entre 0,1 et 2 bars (10 à 200 kPa). Cette technique est utilisée pour la débactérisation et la clarification de suspensions contenant des particules solides ou des macromolécules de dimension colloïdale (Romdhane, 2014). Dans le traitement des fluides aqueux usés, la microfiltration peut intervenir par le retrait des matières biologiques unicellulaires, principalement les bactéries. (Mercier-Bouchard, 2017)

Elle est utilisée en général pour la rétention des particules en suspension et est caractérisée par des débits volumiques de perméat plutôt élevés. Les systèmes de membranes planes et spiralées se trouvent de ce fait peu adaptés comparés aux systèmes tubulaires et à fibres creuses qui sont les plus employés. Afin d'éviter le colmatage des pores de la membrane, deux règles liées aux contraintes, parfois contradictoires doivent être observées. (Arzate, 2008)

Premièrement, la pression intermembranaire doit être maintenue faible au démarrage et pendant le processus. En effet, si la pression initiale s'accroît trop rapidement, elle engendre un flux élevé dans un temps bref et provoque le colmatage de la membrane qui a une grande perméabilité. Pour éviter un tel dénouement, il est indispensable de réguler l'installation en assurant un flux constant.

Deuxièmement, la vitesse de circulation doit être élevée, car le processus de colmatage est d'origine particulaire. En effet, plus les particules à éliminer sont petites, plus grande doit être la vitesse de circulation. Elle va à l'encontre de la règle précédente, car assurer un débit plus grand nécessite l'augmentation de la pression d'entrée.

Le respect de ces deux principes de mise en œuvre implique un suivi régulier et l'équilibre entre la vitesse de circulation, la pression transmembranaire et la longueur du système. C'est pourquoi les modules à fibres creuses et les membranes tubulaires sont généralement utilisés. (Arzate, 2008).

4.4.6 Efficacité des procédés membranaires

Les procédés membranaires sont efficaces dans le traitement des liquides usagés en fonction des objectifs initiaux de séparation. Comme indiqué sur la figure 4.17, des substances sont retenues en fonction du type de membrane utilisé. Par exemple, la membrane de nanofiltration retient les ions multivalents et laisse passer les ions monovalents quand l'ultrafiltration laisse passer les deux types d'ions.

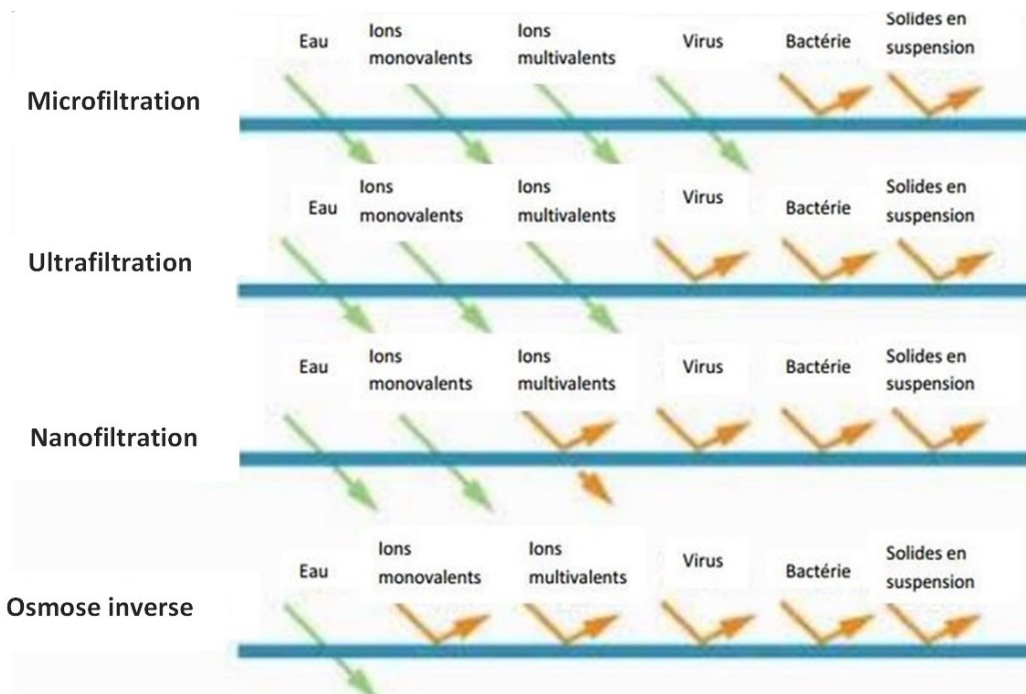


Figure 4.17 : Efficacité comparée des différents types de membranes (tiré de Safe drinking water foundation, s.d.)

4.5 Les procédés par voie thermique

Les procédés par voies thermiques sont variés et consiste en des opérations successives de chauffage et de refroidissement avec un contrôle strict des cycles et des températures (Fayolle et Coll., 2001). Ce processus est illustré sur la figure 4.18 ci-après. La portion AB indique l'échauffement progressif du composé, suivi de BC au cours de laquelle la température est maintenue constante. Enfin, le refroidissement en CD selon le type de fluide utilisé; à savoir lent dans le four et à l'air, rapide avec l'huile et très rapide dans l'eau. (Bensaada, 2019)

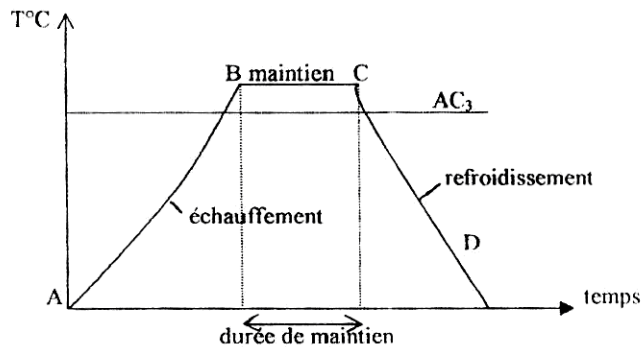


Figure 4.18 : Cycles de chauffage et refroidissement du traitement thermique (tiré de Bensaada, 2019)

Le but de ces opérations est d'améliorer les caractéristiques des matériaux et liquides afin de les rendre plus adaptés à un emploi donné. Ils peuvent être mis en œuvre aussi bien sur des composés solides que liquides.

Le traitement thermique des liquides peut se faire suivant deux systèmes. Premièrement, le système discontinu utilisé lors de la pasteurisation est réalisé par chauffage discontinu du liquide au sein d'une cuve agitée. Deuxièmement, le système continu peut être appliqué en pasteurisation comme en stérilisation. Le principe consiste à porter le liquide à sa température de traitement par échange de chaleur avec un fluide plus chaud, le maintenir à la température de traitement par chambrage pendant le temps nécessaire, puis le refroidir par la suite.

4.5.1 Échangeurs de chaleur

Il se tient dans des échangeurs tubulaires ou à plaques ou à surface raclée, combiné avec un chambreur pour maintenir la température d'opération. Le choix du type d'échangeur de chaleur est fonction de la viscosité croissante du produit. Ainsi, l'échangeur à plaque est adapté pour les moins visqueux quand pour les plus visqueux, la surface raclée est convenable. Lorsqu'un fluide traverse un appareil de traitement thermique, il y passe un temps de séjour moyen défini par le rapport entre le volume de l'appareil et le débit volumique du fluide.

Cependant, ce temps de séjour n'est pas homogène pour tous les éléments du mélange traité. C'est-à-dire certains progressent plus vite quand d'autre le font plus lentement. Ce phénomène est appelé « dispersion des temps de séjour » et impose une augmentation du traitement pour atteindre le couple temps/température optimal. Ce fait engendre donc des coûts énergétiques supplémentaires. Pour pallier cet inconvénient, il est possible de créer une zone de récupération dans laquelle le produit non traité thermiquement est réchauffé et celui déjà traité est refroidi. Dans cette zone, le coefficient de récupération habituel est de l'ordre de 90 à 92 % et les échanges de chaleur se font par circulation à contre-courant. (Agro-alimentaire, 2009)

➤ Échangeur de chaleur à plaques

Les échangeurs de chaleur à plaques utilisent des plaques métalliques pour transférer la chaleur entre deux fluides. Ils présentent une grande capacité d'opération et une bonne facilité d'entretien contrairement aux échangeurs tubulaires. Ils sont fréquemment utilisés dans l'industrie alimentaire comme les laiteries et les brasseries. Ils ont pour avantage majeur de faciliter le transfert de chaleur du fait de la plus grande surface de contact qu'offre la plaque. (Agro-alimentaire, 2019) Ce type d'échangeur est constitué d'une coque qui est un grand récipient sous pression avec un faisceau de tubes à l'intérieur. Un fluide traverse les tubes et un autre fluide circule au-dessus à travers la coque pour transférer la chaleur entre les deux fluides (Spécialités industrielles Sherbrooke, 2020). Le débit de produit est orienté dans plusieurs canaux de flux parallèles intercalés de canaux de fluide colporteur comme indiqué sur la figure 4.19 dessous.

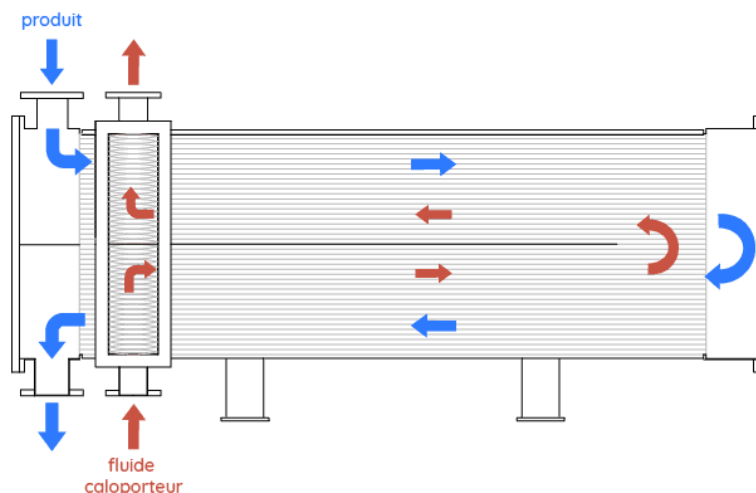


Figure 4.19 : Schéma d'un échangeur de chaleur à plaques (tiré de Weplex, 2022)

Les applications des échangeurs à plaques sont nombreuses, notamment les pasteurisateurs, le traitement des boissons, les refroidisseurs, les connecteurs entre les chaudières et les tours de refroidissement ainsi

que dans divers autres procédés. Il existe quatre principaux types d'échangeurs de chaleur à plaques : (Micet, 2022)

- échangeurs à plaques et joints : Les joints scellent les plaques ensemble et évitent les fuites. Les couts de maintenance sont réduits;
- échangeurs à plaques brasées : Utilisés dans des systèmes de réfrigération. Ils sont faits en acier inoxydable brasé avec du cuivre leur conférant une forte résistance à la corrosion;
- échangeurs à plaques soudées : Ils sont semblables aux échangeurs à plaques et joints, mais les plaques sont soudées ensemble. Ils sont très durables et adaptés pour des traitements à haute température et des matériaux corrosifs;
- échangeurs à plaques semi-soudées : C'est une combinaison de plaques soudées et de joints avec deux plaques par paires soudées ensemble et scellées à une autre paire de plaques. Ils présentent un risque minime de perte de fluide.

➤ Échangeurs de chaleur tubulaires

Dans les échangeurs tubulaires, le produit et le fluide thermique circulent dans des conduits concentriques, l'un dans l'espace annulaire et l'autre dans l'espace central et permettent la circulation des produits à grande vitesse. Ils fonctionnent donc en mode turbulent empêchant ainsi l'encrassement du système et sont adaptés pour le traitement des produits visqueux à forte teneur de matières solides. L'inconvénient de ce type d'échangeur est qu'il est encombrant et peu polyvalent. La figure 4.20 ci-après schématise l'échangeur tubulaire où le rouge représente le liquide colporteur et le bleu, le produit traité.

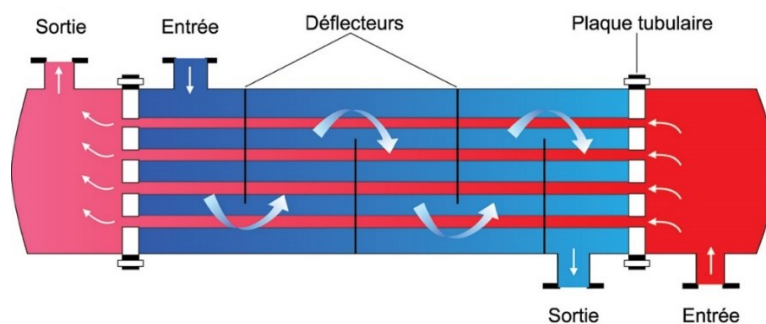


Figure 4.20 : Schéma d'un échangeur de chaleur tubulaire (tiré d'Adeline, 2021)

Il existe deux types d'échangeur tubulaire : (Agro-alimentaire, 2009)

- échangeurs multicanaux : C'est un ensemble de tubes droits ou spiralés de diamètres croissants et disposés de façon concentrique. Le fluide et le produit circulent de façon alternative et à contre-courant à l'intérieur de chaque tube avec au bout, une tête de répartition. L'espace annulaire est réservé

systématiquement à l'écoulement du fluide colporteur de manière à assurer un traitement thermique homogène ;

- échangeurs multitubes : Il est composé d'un carter cylindrique dans lequel sont montés des tubes en parallèle. Le produit circule à l'intérieur des tubes et le fluide caloporteur à l'intérieur du carter. Ils autorisent des opérations sous forte pression et à haute température sur des produits visqueux contenant des débris et particules de diamètre inférieur à 50 mm.

➤ Échangeurs de chaleur à surface raclée

L'échangeur à surface raclée est employé pour les produits les plus visqueux, voire pâteux. Il n'est pas adapté pour les fluides de coupe usés qui sont plus fluides et très peu visqueux. L'action des pales ou couteaux qui raclent la surface d'échange améliore l'efficacité du système. Ils sont adaptés pour traiter tout type de mélange avec des pressions de travail pouvant atteindre les 4 000 kPa. Il s'agit généralement de conception monotube comportant deux cylindres concentriques le plus souvent orientés verticalement. Le produit est alimenté à la base de l'échangeur de manière à faciliter la purge d'air par la partie supérieure. Néanmoins, il existe également des dispositions horizontales. La figure 4.21 ci-dessous présente les composants d'un échangeur à surface raclée avec les rotors et lames pour racler la surface de contact.

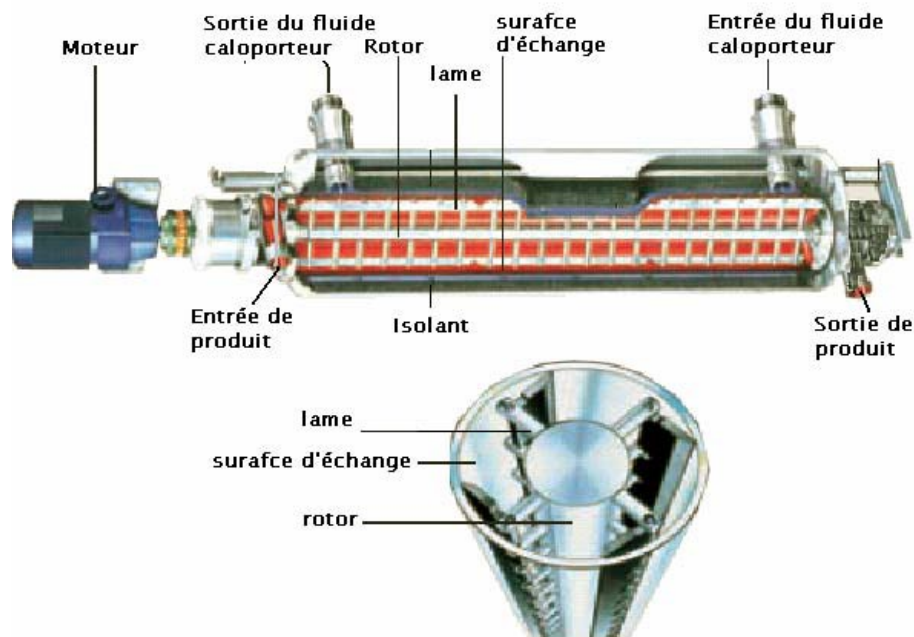


Figure 4.21 : Schéma d'un échangeur de chaleur à surface raclée (tiré de Yataghene, 2007)

Ils sont constitués d'un cylindre (stator) à l'intérieur duquel se trouve un arbre tournant (rotor) sur lequel sont fixées des lames. Le stator sert d'échange thermique avec le produit et est équipé d'une double enveloppe où peut circuler le fluide caloporteur (eau chaude ou froide, eau glycolée, vapeur d'eau). Le nombre de lames varie en fonction des constructions entre deux et quatre généralement. L'espace entre le rotor et le cylindre intérieur est appelé espace annulaire. Pendant son fonctionnement, les lames viennent racler périodiquement la surface d'échange évitant ainsi le problème d'encrassement.

L'action des lames conduit à un renouvellement continu du produit à la paroi et permet une meilleure distribution de la température et un bon transfert thermique. Il existe deux types d'échangeurs à surface raclée selon les modèles. Dans certains, l'espace annulaire entre le rotor et le stator est totalement rempli par la solution traitée et dans d'autres, cet espace est occupé de façon partielle et les lames étalent le produit en formant une couche mince. Le choix du type d'appareil à surface raclée dépend du procédé de traitement à appliquer à un produit donné. (Yataghene, 2007)

4.5.2 Stérilisation directe et indirecte

Le procédé de la stérilisation nécessite un traitement à haute température et implique l'emploi de fluide caloporteur à vapeur ou à eau surchauffée. Il peut être de type direct ou indirect selon que le produit traité et le fluide caloporteur se mélangent ou non lors de la phase de chauffage. (Agro-alimentaire, 2009)

➤ Stérilisation indirecte

Les équipements de la stérilisation indirecte sont semblables à ceux utilisés pendant la pasteurisation, mais ils intègrent les contraintes de travail à haute pression. Du fait des températures élevées, le travail en mode indirect entraîne l'altération du produit traité en comparaison avec le traitement direct. Néanmoins, il a pour avantage d'assurer la séparation totale entre produit traité et liquide caloporteur. Les modèles en forme tubulaire permettent de diminuer l'encrassement par sa conception hydrodynamique. (Agro-alimentaire, 2009)

➤ Stérilisation directe

Le principe du traitement direct consiste à chauffer la solution traitée par un mélange intime avec la vapeur. En effet, le produit est mis en contact avec la vapeur chaude qui se condense en libérant instantanément sa chaleur. Dans ce système, l'augmentation de la température se produit plus rapidement que le chauffage indirect. Cette température est maintenue entre 140 et 150 °C pendant 2 à 5 secondes. Le contact direct entre la vapeur et la solution traitée implique une dilution de cette dernière de l'ordre de 10 %. Ce fait nécessite d'appliquer une correction par élimination de l'excès d'eau. Cette

opération a lieu dans une chambre d'expansion à vide dans laquelle la vapeur est extraite. (Agro-alimentaire, 2009)

4.5.3 Autres modes de traitement thermique

De nouvelles techniques de traitement thermique à haute efficacité énergétique s'ajoutent aux procédés traditionnels de chauffage et de stérilisation par contact sur des surfaces chauffantes. Ces traitements proviennent principalement des électrotechnologies et sont composés des rayonnements infrarouges (IR), des hautes fréquences (HF), des microondes (MO), du chauffage ohmique et du chauffage par induction.

Les principaux avantages de ces technologies résident dans (Ressources naturelles Canada, 2020) :

- leur rendement énergétique élevé (jusqu'à 95 %);
- un chauffage direct sans fluide intermédiaire;
- des mises en marche, arrêts et réglages rapides;
- des ajustements précis de la puissance de chauffe;
- l'absence d'huile pour les opérations de cuisson;
- la perte minimale de poids et de volume du produit.

➤ Le rayonnement infrarouge

Il est effectué par des résistances électriques ou des radiants au gaz naturel portés à la température nécessaire de plusieurs centaines de degrés leur permettant d'émettre des radiations. Ce rayonnement est généralement absorbé à la surface du produit. Ce procédé est une alternative crédible aux techniques traditionnelles. Son avantage est que l'énergie est transmise directement au produit sans fluide intermédiaire. La durée de l'opération est courte et le contrôle est facile ce qui réduit les coûts et l'impact sur l'environnement. Cependant, il est efficace pour le traitement de surface ou pour des couches fines de produits. Il ne permet pas un traitement homogène de la solution et peut conduire à sa dégradation. (Ressources naturelles Canada, 2020)

➤ Les microondes et les hautes fréquences

Le principe consiste à créer un champ électrique alternatif qui induit un mouvement des molécules qui à leur tour de la chaleur. Leur efficacité, notamment l'homogénéité du chauffage dépend de la nature, de la forme et de l'épaisseur du produit. Utilisé en intermittence, ils ont l'avantage d'éviter la surchauffe du produit traité et sont adaptés pour le contrôle bactérien. De plus, l'énergie étant absorbée en volume, les pertes sont minimales et la durée de l'opération est réduite. (Ressources naturelles Canada, 2020)

➤ Chauffage par induction

Le traitement se fait disposant un produit dans un champ magnétique variable. Des courants de Foucault se développent au sein du produit traité et provoquent son échauffement par effet joule. Le chauffage peut se faire de deux façons. Il peut être direct et la chaleur se développe au sein même de la masse à chauffer ou indirect et c'est une enveloppe (généralement métallique) entourant le produit qui est chauffée par induction. Il est adapté pour le chauffage et la stérilisation des liquides et produits pâteux. (Ressources naturelles Canada, 2020)

4.6 Séparation magnétique des copeaux

La présence de débris métalliques dans les produits est source de risques pour la sécurité et peut endommager les équipements de travail. L'élimination des fractions métalliques (copeaux, particules) des liquides et matières en cours d'utilisation est une pratique courante dans l'industrie. La séparation magnétique est une approche pour réduire et éliminer cette contamination métallique. La source de contamination par les métaux est variée et dépend du secteur d'activités. (Direction de la salubrité et de l'inspection des aliments, s.d.) Au niveau de l'usinage des pièces, les copeaux issus de l'abrasion du matériau usiné sont la principale source de contamination.

4.6.1 Types de séparateurs magnétiques

Une gamme variable de modèles de séparateurs magnétiques est disponible avec différentes utilisations possibles aussi bien pour des produits solides ou liquides. Le tableau 4.5 ci-dessous synthétise certains des séparateurs magnétiques les plus couramment utilisés dans l'industrie.

Tableau 4.5 : Types de séparateurs magnétiques (modifié de Direction de la salubrité et de l'inspection des aliments, s.d.)

Conception de séparateur magnétique	Description	Utilisation
Barres aimantées	Unités magnétiques non électriques permanentes	Enlever la contamination métallique dans de petites quantités peu profondes de poudre, de granulés, de fibres et de liquides qui s'écoulent
Plaques aimantées	Installé dans le fond d'une goulotte inclinée ou suspendu au-dessus des bandes transporteuses	Retirer les gros morceaux de métal des produits secs
Grilles aimantées	Tubes magnétiques dans une configuration de grille et permet au flux de matériau de basculer à travers la grille	Enlever les particules fines ou relativement grosses de contaminants métalliques
Filtre magnétique pour liquides	Filtres avec aimants tubulaires à l'intérieur avec un orifice d'entrée correspondant aux canalisations existantes	Retirer les pièces métalliques
Aimants suspendus	Suspendu au-dessus des bandes transporteuses, il retire les fragments de métal du matériau transporté sur un convoyeur	Retirer les gros morceaux de métal

4.6.2 Dispositifs aimantés pour fluides de coupe

Plusieurs dispositifs sont utilisés pour la séparation magnétique dans l'industrie. En ce qui concerne les fluides de coupe usagés, les constructions suivantes sont adaptées :

➤ **Séparateurs électromagnétiques à disques**

Le séparateur à disques rotatifs est un système de filtration à aimants qui fonctionne grâce à des disques fortement magnétisés. Il est utilisé pour la filtration des liquides de coupe contenant des particules métalliques et qui ne demandent pas un degré de filtration élevée. C'est un système à aimants permanents avec un jeu de disques en rotation à forte attraction. Le liquide rejoint le séparateur en passant à travers les disques magnétiques. Les particules restent ainsi collées aux disques et le liquide propre tombe dans la cuvette de stockage. Elles sont ensuite raclées par un peigne en acier inox pour leur prise en charge. (Techni-contact, 2022) Il est destiné à séparer les particules polluantes magnétiques des fluides de coupe utilisés dans les usinages mécaniques (Direct Industry, 2022). Les débits de traitement varient de 25 L/min à 600 L/min. La figure 4.22 ci-dessous schématise le fonctionnement du séparateur à disques.

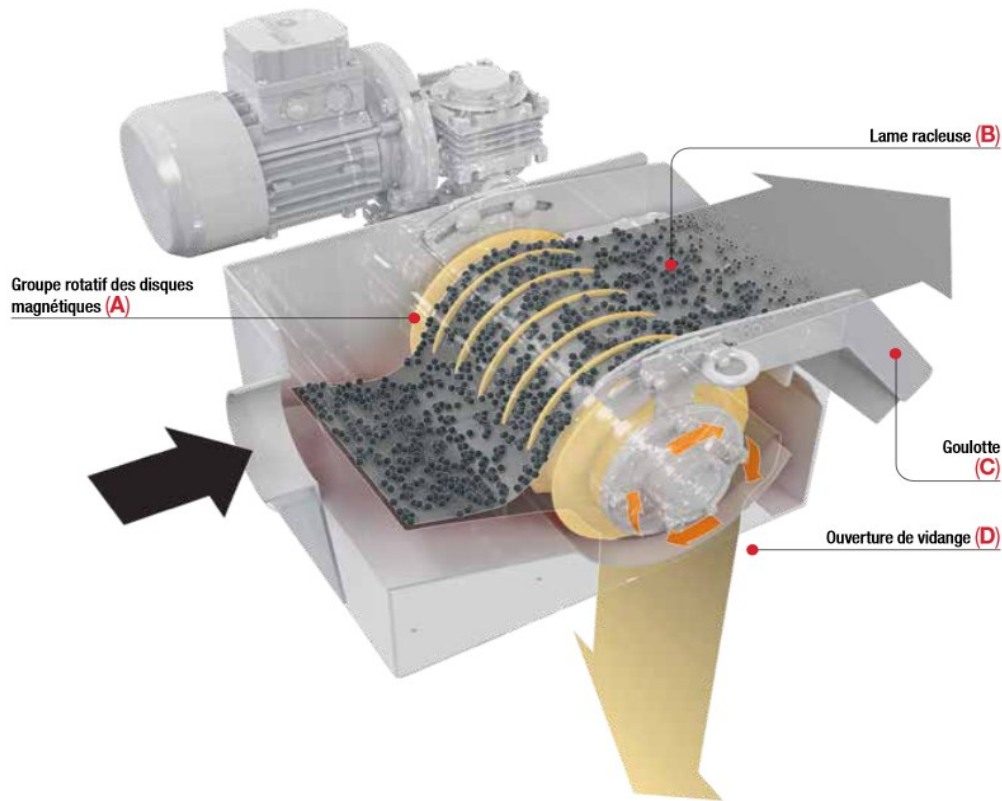


Figure 4.22 : Schéma d'un séparateur à disque (tiré de la fiche technique Demag de Losma)

Le liquide contaminé traverse le groupe rotatif des disques magnétiques (A) où sont capturées les particules magnétiques polluantes. Une lame racleuse (B) élimine en continu les particules se trouvant sur le groupe rotatif pour les acheminer vers une goulotte (C) qui les déverse dans un récipient. Le liquide épuré est récupéré dans le bac sous-jacent (D) puis renvoyé à la machine-outil au moyen de l'électropompe de relevage prévue à cet effet. Il peut être aussi récupéré par un second épurateur afin de procéder à une filtration plus fine. (Losma, s.d.)

Néanmoins, pour obtenir le degré de filtration souhaité, ce système peut être combiné à d'autres techniques de filtration; notamment pour ce qui concerne les fractions dissoutes, les huiles indésirables, les microorganismes et autres.

➤ **Séparateurs électromagnétiques à grille**

Le séparateur à grille sert à retirer les particules ferromagnétiques des mélanges et matériaux liquides comme les mélanges réfrigérants et les émulsions utilisées pour l'usinage des pièces. La partie intérieure du séparateur est faite de tubes magnétiques avec des aimants au néodyme puissants. Les tubes d'aimants

sont exposés à l'action agressive constante des liquides et produits chimiques; ce qui impose l'entretien régulier de ces derniers. (Sollau, 2020)

4.7 Coalescence et écrémage des huiles

Il existe différents procédés qui permettent de déshuiler les fluides aqueux. Selon l'efficacité, ces techniques peuvent se classer par ordre croissant dans le tableau 4.6 ci-après où 1 représente l'efficacité la moins élevée et 4, la plus grande.

Tableau 4.6 : Classification des techniques de déshuilage selon l'efficacité (inspiré de Cetim, 2006)

Technique	Efficacité
Déshuileurs de surface	1
Déshuileurs à coalescence	2
Centrifugeuses (séparation liquide - liquide)	3
Techniques membranaires (microfiltration, ultrafiltration)	4

4.7.1 Coalescence

Le principe de coalescence consiste à agréger les gouttelettes d'huile en suspension pour permettre leur libération en surface du liquide présent dans le déshuileur et de les extraire ensuite par débordement ou soutirage. Il existe sur le marché deux types de coalesceurs; à savoir les coalesceurs à plaques métalliques et ceux constitués d'anneaux plastiques. (Centre technique des industries mécaniques, 2006) Ce phénomène peut se produire dans les écoulements de fluides lorsque deux phases ou plus sont en présence. Certains évoquent la fusion de deux globules en un seul à l'intérieur d'un fluide quand pour d'autres, la fusion a lieu sur un support approprié par impact et ruissèlement (Fitremann, 1984). En d'autres termes, c'est le mécanisme à travers lequel deux substances semblables, mais dispersées, se rejoignent et fusionnent.

La coalescence permet de séparer deux fluides dont les tensions interfaciales ou superficielles sont différentes. C'est le cas par exemple de l'eau et de l'huile. Elle est efficace avec l'eau à cause de la forte attraction exercée par les molécules d'eau; équivalant à 72,8 dyn/cm à 20 °C par rapport à celle d'autres liquides. Elle joue un rôle important dans le phénomène de capillarité. Le tableau 4.7 ci-dessous donne la valeur de la tension pour quelques liquides et mélanges. Elle est différente selon le fluide ainsi que la température. L'eau à 37 °C de tension égale à 70 dyn/cm peut être extraite d'une huile à 35 dyn/cm. (ID System Fluid, 2019)

Tableau 4.7 : Tension superficielle de certains liquides (tiré de ID System Fluid, 2019)

Fluide	Tension superficielle (dyn/cm)
Eau à 0 °C	75
Eau à 20 °C	72
Eau à 37 °C	70
Eau à 50 °C	68
Eau avec 2 % de tensioactif	31
Eau avec 2 % d'huile	47
Tensioactif	29
Huile	35

Le processus de traitement comprend 3 étapes. D'abord, la filtration permet d'éliminer les particules solides; ce qui a pour bénéfice de protéger les 2 étapes ultérieures. Ensuite, a lieu dans un second corps de filtre, la coalescence au cours de laquelle le fluide passe de l'intérieur vers l'extérieur du système de membranes, conduisant les particules d'eau à coalescer pour produire des particules plus grosses. Enfin se produit le processus de séparation où l'huile débarrassée d'une grande partie de l'eau passe cette fois de l'extérieur vers l'intérieur à travers une membrane hydrophobe. Il résulte de cette opération, la rétention des dernières particules libres d'eau. Cette eau est alors collectée par gravité au bas du filtre membranaire et éliminée par vidage selon un mécanisme automatisé ou manuel. (ID System Fluid, 2019)

La coalescence a pour avantage, son efficacité élevée pouvant atteindre 90 % d'élimination de l'eau libre en un seul passage. Cependant, elle n'élimine pas l'eau dissoute et les tensioactifs utilisés dans les huiles contribuent à désamorcer la coalescence. Cette technologie est mieux adaptée pour les grands volumes d'huile de lubrification comme les huiles entières et le traitement de carburants. (ID System Fluid, 2019) Elle pourrait montrer des insuffisances pour l'épuration des mélanges aqueux, objet de la présente étude. Ces faiblesses s'expliquent d'une part, par la grande présence de tensioactifs dans ces mélanges pour faciliter l'émulsion stable entre l'huile et l'eau; ce qui rend la coalescence difficile et d'autre part, la dissolution de l'huile dans l'eau (Hamdache, 2012).

4.7.2 Écrémage

L'écrémage d'huile est le procédé qui consiste à collecter les huiles flottantes à la surface de l'eau par balayage en surface à l'aide d'un système flottant mené par l'action d'une cellule d'entraînement qui récupère l'huile. Il est utilisé dans diverses situations dont les applications industrielles d'écrémage d'huile

flottant de grande ou faible quantité, dans des contextes variés impliquant des activités de fabrication industrielle, de traitement et de gestion des eaux usées. Il existe plusieurs types d'écrémeurs (ETEMI, 2021).

➤ Écrémeur à bande

Les écremeurs à bande utilisent un cordon en polypropylène fibrillé de propriété oléophile, c'est-à-dire qu'il attire l'huile, pour éliminer les huiles flottantes dans une large gamme d'applications industrielles ou de nettoyage de déversements (ETEMI, 2021). Ce système permet de capter les graisses et les huiles dans une gamme complète de viscosités sur les bacs de décantation ou de déshuilage. Il est installé au-dessus du bac et la bande qui est entraînée par une poulie se charge en huile et en graisse. Des outils racleurs en surface déchargent la bande des produits collectés qui sont alors dirigés vers un bac de récupération. Le nombre de bandes installées sur l'équipement et leur largeur ont un impact direct sur le débit de fonctionnement du système. (Silex International, 2022)

➤ Écrémeur à disques

L'écrémeur à disque se compose d'une ligne de 8 disques oléophiles avec des bancs à brosse permettant de récupérer une gamme complète d'huiles et de viscosité (RCY, 2014). La figure 4.23 ci-après donne une vue de cet écremeur. Chaque rangée est entraînée par son propre moteur hydraulique. Les huiles et graisses adhèrent aux surfaces et sont raclées ensuite par des languettes. Les disques sont tournés vers le bas à travers la nappe d'huile et l'huile descend dans les racloirs puis dans un réservoir, où une pompe décharge l'huile vers les réservoirs de collecte (Mavideniz, 2022). Il est recommandé pour une utilisation avec des hydrocarbures à moyen et faible viscosité. Les disques sont faits en polypropylène (PP) avec des racleurs de disques en PVC et résistent aux acides, solvants, hydrocarbures et rayons ultraviolets (UV).



Figure 4.23 : Écrémeur à disque (tiré de RCY, 2014)

➤ Écrémeur à tambour

Les tambours pleins sont motorisés à l'air ou à l'hydraulique et restent presque insubmersibles. Ils tournent à faible vitesse de rotation pour permettre une exposition maximale de la surface à l'huile. Le produit collecté à la surface des tambours est ensuite raclé au moyen d'une lame d'essuie-glace dans un bac de récupération où il est aspiré dans un réservoir de récupération. La figure 4.24 illustre l'écrémeur à tambour.



Figure 4.24 : Écrémeur à tambour (tiré de RCY, 2014)

➤ Écrémeur à seuil

Les écrémeurs à seuil sont munis d'un seuil flottant placé au point de contact entre les hydrocarbures et l'eau. Ils sont constitués de trois flotteurs équipés d'un seuil auto ajustable comme présenté sur la figure 4.25 ci-après. Le niveau d'eau dans la trémie est fixé par l'anneau qui entoure le kit de pompage flottant. Ce mécanisme élimine efficacement les couches d'huiles ou de polluant en surface. Il est muni d'un entonnoir en dessous duquel une pompe submersible est installée afin d'assurer le transfert des hydrocarbures.

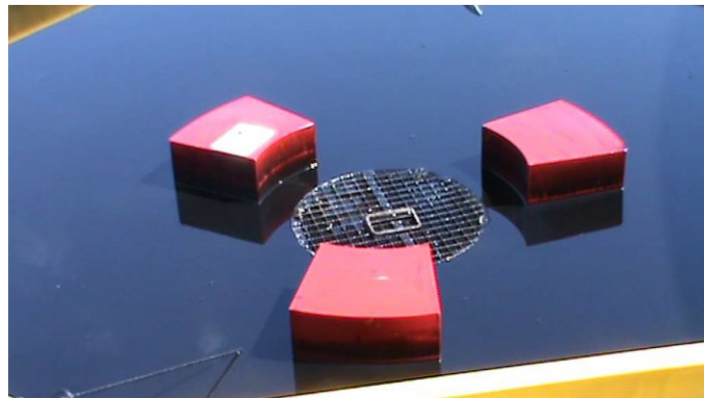


Figure 4.25 : Écrémeur à seuil (tiré de RCY, 2014)

Au niveau spécifique du traitement des fluides de coupe, les dispositifs qui allient les principes de coalescence et d'écumage permettent de séparer les huiles parasites dans les mélanges aqueux sans attendre leur remontée et accumulation en surface. La figure 4.26 ci-après schématise ce dispositif dans lequel le liquide à traiter passe à travers les écrémeurs d'huiles avant d'être conduit dans le coalesceur. Le fluide est aspiré à la surface par le biais d'une pompe non émulsionnante et passe dans la chambre primaire du déshuileur où un premier écumage libre est réalisé. Le liquide est conduit ensuite dans une chambre de séparation contenant des installations de coalescence qui accélèrent la séparation de l'émulsion et des huiles parasites. Ce système est plus adapté au traitement de gros volumes de fluide de coupe et assure une élimination rapide des huiles parasites. (CNIDEP, 2020)

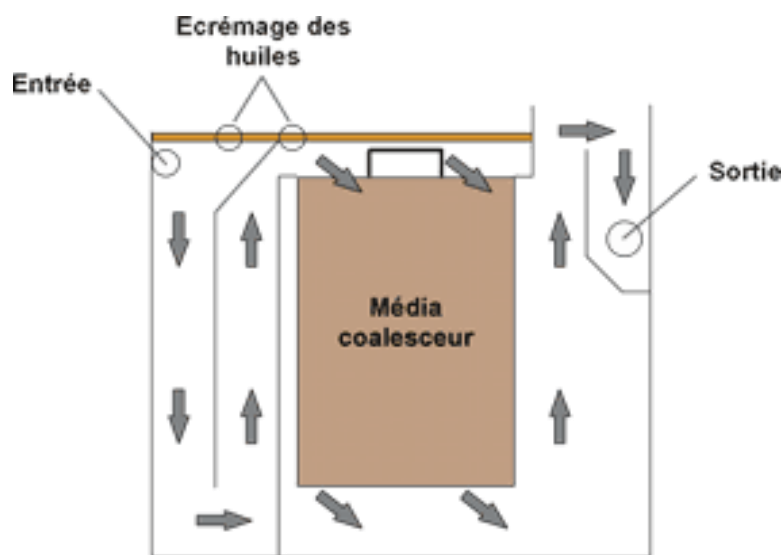


Figure 4.26 : Schéma de fonctionnement du dispositif d'écumage et de coalescence (tiré de CNIDEP, 2020)

4.8 Centrifugation

La centrifugation est un processus par lequel les composés d'un mélange sont séparés en fonction de leur différence de densité en les soumettant à la force centrifuge. Il peut être employé dans le cas d'un mélange à deux phases liquides, ou bien des particules solides en suspension dans un fluide. (ID System Fluid, 2019)

La figure 4.27 ci-dessous présente le dispositif qui comporte un axe vertical fixe de rotation sur lequel le fluide est déversé et la force centrifuge entraîne sa ségrégation en une portion épurée des copeaux et limailles et une partie non traitée. Elle permet de purifier les fluides de coupe aqueux par une extraction rapide des particules métalliques. Les centrifugeuses utilisées en déshuilage (séparation liquide – liquide) ont des vitesses de rotation d'environ 10 000 tr/min, ce qui permet d'atteindre des forces centrifuges d'environ 10 000 g (accélération centrifuge).

Les modèles existants peuvent être fixes ou montés sur des roulettes utilisées en continu ou en discontinu. Les pales du système de rotation provoquent l'accélération du liquide et induisent la séparation des particules aussi bien magnétiques que non magnétiques qui sont projetées par la force centrifuge sur la paroi du contenant de récupération. (CNIDEP, 2020) Ces machines permettent donc d'extraire les particules qui sont collectées à la périphérie du récipient du séparateur. En revanche, le volume de la centrifugeuse doit être adapté la proportion de particules à extraire afin de contrôler la fréquence de démontage et nettoyage manuel.

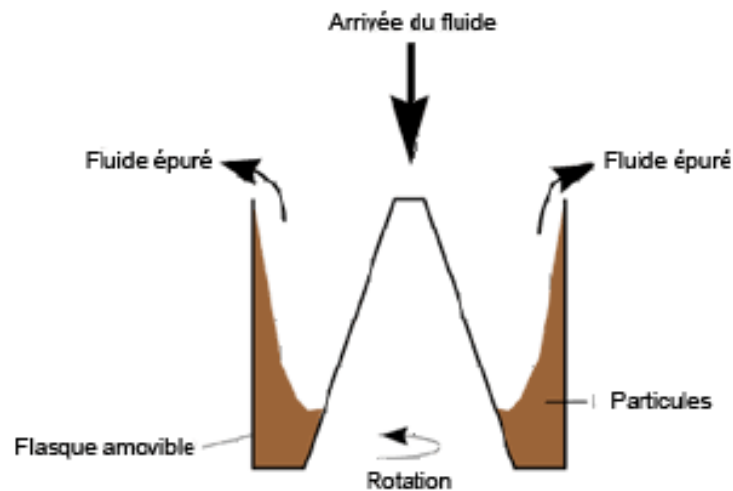


Figure 4.27 : Schéma de la centrifugation (tiré de CNIDEP, 2020)

Cette technologie appliquée au traitement des huiles élimine l'eau libre présente dans une huile. Cependant, les coûts d'investissement et de maintenance s'avèrent élevés et elle est sujette à des pannes potentielles dues aux mécanismes de rotation (ID System Fluid, 2019).

5. ANALYSE DES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT ET CHOIX DE L'OPTION APPROPRIÉE

Une analyse menée sur les différents procédés de traitements doit permettre un choix éclairé pour sélectionner l'option de réemploi adaptée au contexte de Verbom Inc. La méthode d'analyse adoptée pour cette étude est l'analyse multicritère. (Dallaire, 2012) Celle-ci est conduite dans une perspective de développement durable; c'est-à-dire qu'elle prend en considération les critères sociaux, économiques et environnementaux.

En d'autres termes, il s'agit de développer un cadre d'analyse pour évaluer de façon comparée différentes techniques de traitement des liquides de coupe usagés, tout en considérant concurremment plusieurs critères de performance dans le contexte économique, social, environnemental et technique de l'usine U3 de Verbom Inc. à Valcourt. Elle comprend la présentation des différents scénarios et options de traitement, la définition et pondération des critères, la mise en œuvre de l'analyse et les conclusions qui en découlent (Frenette, 2009). Elle permettra de comparer les procédés d'épuration suivants: la méthode physicochimique, la technique biologique, le traitement par voie thermique et les procédés membranaires.

5.1 Définition et présentation de la méthode

L'analyse multicritère, aussi appelée aide multicritère à la décision, est un ensemble d'outils d'aide à la décision développés depuis les années 1960 (Renaud, 2003) et dérivée du management de la valeur des normes française selon l'AFNOR (2014). En d'autres termes, c'est un outil stratégique qui permet d'effectuer un choix entre plusieurs solutions en décomposant une grille d'analyse en plusieurs critères. Chacun d'eux est pondéré d'un coefficient qui rend compte de son niveau d'importance par rapport aux autres critères. Cet outil permet d'orienter la prise de décision en évaluant plusieurs options possibles à partir de critères définis. Autrement dit, il sert à mener un jugement comparatif entre des possibilités de choix parfois hétérogènes (CMM, 2007).

Dans le contexte de ce travail, l'analyse sert à justifier les propositions faites quant au choix de l'option de traitement privilégiée des fluides de coupe usagés en vue de leur réemploi dans les opérations de l'usine U1 de Verbom Inc. à Valcourt.

5.1.1 L'aide à la décision

Le processus de prise de décision est une méthode qui consiste à rassembler des informations et à évaluer les alternatives avant de faire un choix définitif; le tout, dans le but de prendre la meilleure décision possible (Ba, 2009). Selon Roy et Bouyssou (1993), le processus d'aide à la décision se définit comme étant

« l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités, mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision. Éléments qui concourent à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ». Il s'agit donc d'arriver à un consensus cohérent à partir des connaissances relatives à situation.

Il existe de nombreux outils pour faciliter la prise de décision. D'une manière générale, ils se classent dans plusieurs catégories selon leur finalité : analyser une problématique, rechercher les causes à l'origine de la situation, trouver les solutions possibles, hiérarchiser les meilleures options, choisir la solution la plus adaptée (Granger, 2020). En outre, pour Tsoukias (2008), différentes approches existent dans l'élaboration des modèles et outils :

- approche normative : Le modèle de rationalité est défini d'avance et le décideur doit s'y conformer;
- approche descriptive : Le modèle est fondé sur l'observation et la préférence du décideur;
- Approche prescriptive : Le modèle s'élabore à l'intérieur du processus décisionnel et donc limité aux conditions locales;
- approche constructive : Le modèle de rationalité est construit à partir des réponses apportées aux questions du décideur en lien avec ses préférences. La démarche conduit à la formulation du problème en même temps que la construction de la solution associée. Elle consiste à modéliser à la fois le problème à traiter et les préférences du décideur. C'est dans cette approche que figure l'aide multicritère à la décision.

Le tableau 5.1 ci-après fait la synthèse des approches de prises de décision.

Tableau 5.1 : Caractéristiques des approches d'aide à la décision (tiré de Tsoukias, 2008)

Approches	Caractéristiques
Normative	Rationalité exogène, comportement économique
Descriptive	Rationalité exogène, modèles empiriques du comportement
Prescriptive	Rationalité endogène, cohérence avec la situation problématique
Constructive	Processus d'apprentissage, cohérence avec le processus de décision

5.1.2 L'aide multicritère à la décision

L'aide multicritère à la décision est une branche de la recherche opérationnelle qui intervient dans le processus de prise de décision lorsqu'il y a une grande diversité de critères. Elle est pertinente du fait qu'elle prend en considération les objectifs, souvent multiples, associés à la décision prise par le décideur. (Morais et Almeida, 2006) L'analyse multicritère constitue un cadre de structuration du processus de décision et facilite l'action des acteurs qui interviennent dans la validation de la décision finale (Ba, 2009). Pour la développer, l'analyse multicritère confronte un ensemble d'actions ou variantes en compétition. Pour ces actions, l'analyse va successivement bâtir :

- une famille de critères, permettant de les juger;
- un tableau de performance des actions par critère;
- une agrégation des résultats pour aboutir à un classement par préférence.

L'analyse multicritère peut se faire à partir d'informations à la fois objectives et subjectives.

Pour Roy (2005), les modèles multicritères se fondent sur plusieurs hypothèses. Ce sont entre autres :

- l'éventail des possibilités n'est pas figé dès le départ. Il peut varier au cours du processus et les préférences sont construites tout le long du processus décisionnel;
- la solution n'est pas arrêtée de façon rigide, mais plutôt issue d'un compromis à partir de la multitude de critères;
- les informations nécessaires à l'analyse peuvent être intégrées au fur et à mesure de leur disponibilité.

Le processus d'aide à la décision est une démarche itérative schématisé sur la figure 5.1 ci-après. Il comprend les étapes suivantes :

- la définition des objectifs et des critères;
- l'identification des options;
- la pondération des critères;
- l'établissement d'une échelle de mesure pour chaque critère;
- le choix d'une méthode d'évaluation;
- l'évaluation des options ou des alternatives;
- l'analyse de sensibilité.

L'identification des critères et leur pondération constituent sans doute un des éléments les plus sensibles du modèle multicritère. Deux approches sont appliquées pour définir cet ensemble de critères qui permet par la suite d'évaluer puis de comparer les options. La première approche est descendante puisqu'elle

consiste à décliner l'objectif principal en sous-objectifs dans une structure hiérarchique jusqu'à un niveau mesurable. L'autre approche, qualifiée d'ascendante, permet de demander aux parties prenantes de noter des points précis appelés conséquences élémentaires, capables d'influencer la décision. Ces conséquences organisées en axes de signification sont traduites en critères. Selon l'approche choisie, les critères retenus doivent vérifier les bonnes propriétés de cohérence, d'exhaustivité, de cohésion et de non-redondance. (Urli, 2013)

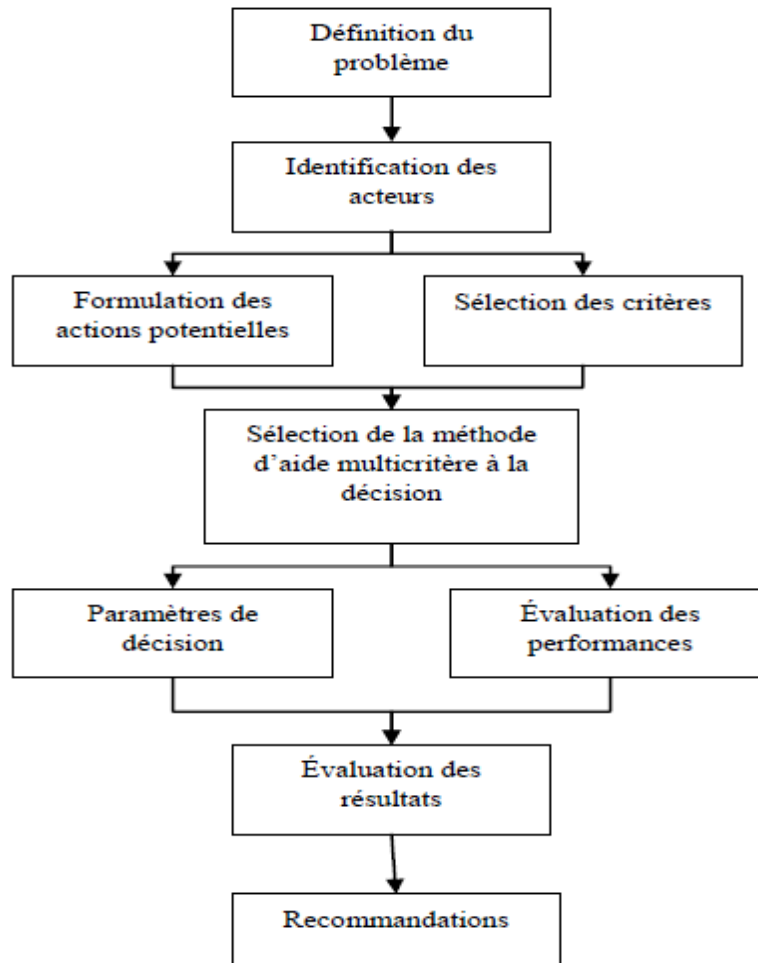


Figure 5.1 : Les étapes du processus de prise de décision (tiré de Morais et Almeida, 2006)

5.2 Synthèse des différents scénarios de traitement

Pour le traitement des fluides de coupe usagés en vue de leur réemploi dans le procédé d'usinage des pièces, plusieurs techniques ont été identifiées et détaillées au chapitre 4. Il s'agit ici de présenter de façon synthétique, ces dernières en mettant en exergue les avantages ainsi que les inconvénients de chacune d'elles.

5.2.1 La méthode physicochimique

Le traitement d'un fluide usagé peut comporter trois étapes consécutives : les traitements physicochimiques dits primaire, secondaire et tertiaire. Chacune des étapes est importante pour obtenir les résultats escomptés (Genesis water tech, 2019). Lors du processus primaire, les solides sont fortement réduits dans une large mesure. Sans celui-ci, l'efficacité des traitements ultérieurs se trouverait limitée. Il se compose de deux chaînes de traitement : la coagulation, la floculation et la décantation ou bien la coagulation, la floculation et la flottaison (INP Toulouse, s.d.). À l'issue de la phase primaire, il peut être nécessaire d'associer un procédé secondaire qui équivaut à un traitement biologique puis une phase tertiaire où les substances microbiologiques indésirées sont éliminées ou neutralisées de sorte à rendre leur action non dangereuse. Le traitement physicochimique est adapté pour le traitement de la matière insoluble comme les matières en suspension (MES), les matières colloïdales et les macromolécules responsables de la turbidité de l'eau ou de sa couleur (Ndiaye, 2022). Le procédé primaire de traitement des fluides usagés présente des avantages et des inconvénients résumés dans le tableau 5.2 ci-après.

Tableau 5.2 : Avantages et inconvénients des traitements primaires (tirée de Genesis water tech, 2019)

	Coagulation		Floculation (désinfection)	
	Chimique	Électrochimique	Chlore	UV
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de précipitation réduit - Enlèvement des particules fines 	<ul style="list-style-type: none"> - Processus simple et facilement réglable - Faible production de boues, non dangereuse - Cible plusieurs contaminants 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilement disponible - Peu coûteux - Puissant agent oxydant 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun effet résiduel nocif - Pas de produits chimiques à manipuler - Efficace contre la plupart des virus, spores et kystes, - Nécessite peu d'espace - Temps de contact plus court
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Processus additif - Dosage complexe - Volume élevé de boues dangereuses 	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques ajustements de pH - Électrodes sacrificielles - L'utilisation de l'électricité peut être chère 	<ul style="list-style-type: none"> - Gout et odeur - Peut créer des sous-produits de désinfection nocifs pour l'homme, les animaux et la vie aquatique - Volatil - Impossible de supprimer tous les agents pathogènes (virus, kystes) 	<ul style="list-style-type: none"> - Inefficace si les matières en suspension sont trop élevées - De faibles doses peuvent être inefficaces contre certains virus, spores et kystes, - Photoréactivation possible

Le processus de traitement physicochimique de façon globale présente les avantages et inconvénients majeurs qu'il importe de considérer lors de sa mise en œuvre. Ils sont énumérés dans le tableau 5.3 ci-dessous ainsi que leurs contraintes financières.

Tableau 5.3 : Avantages et inconvénients du traitement physicochimique (adapté d'INP Toulouse, s.d. et 1H₂O₃, 2022)

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Faible emprise au sol qui facilite la mobilisation et démobilitation des installations - Bonne adaptabilité à des extensions notamment lors de l'ajout d'une phase biologique - Acceptation des variations brutales de charges polluantes - Réduction du temps nécessaire à la décantation des solides en suspension - Grande efficacité pour éliminer les particules fines difficiles à éliminer avec d'autres méthodes - Favorise l'élimination de nombreux protozoaire, bactéries et virus - Adaptés aux installations de grande et de moyennes tailles - Offre une meilleure installation pour lutter contre la turbidité et la couleur
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Performances épuratoires inférieures à celles obtenues par les procédés biologiques - Utilisé seul, il n'est pas compétitif - Couteuse en exploitation et nécessite une phase expérimentale - Difficile automatisation de l'installation - Nécessite un dosage précis de coagulants avec des équipements de dosage performants - Demande un certain niveau de contrôle - Peu adapté aux petites installations
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> - Les coûts d'investissements dépendent de la capacité de traitement des installations et de la technologie mise en œuvre pour la clarification des effluents - Les coûts d'exploitation dépendent de : <ul style="list-style-type: none"> o La main-d'œuvre représente 25 à 40 % du coût global de fonctionnement o Les coûts des adjuvants chimiques représentent 30 à 50 % des charges d'exploitation o L'entretien dont l'évacuation des boues et la maintenance peuvent constituer 5 à 20 % du coût global

En somme, la méthode de traitement physicochimique comporte nombre d'avantages techniques dans l'épuration des eaux usées industrielles, dont sa capacité à éliminer plus rapidement les particules fines,

sa flexibilité face aux variations de charges traitées et ses actions sur les microorganismes et virus présents dans la solution. Cependant, plusieurs désavantages handicapent son utilisation. Il s'agit notamment de son insuffisance à être employée seule, de la lourdeur des charges d'exploitation ainsi la nécessité de disposer d'une main-d'œuvre hautement qualifiée pour les opérations de dosage des coagulants et le suivi contrôle strict des différentes phases.

5.2.2 La technique biologique

Le traitement biologique utilise des microorganismes pour assurer l'élimination des contaminants organiques. Ces microorganismes peuvent opérer en l'absence d'air et d'oxygène; il s'agit du mode anaérobie ou bien ils peuvent agir dans un environnement aéré en présence d'oxygène : c'est le procédé aérobie. Les critères qui aident à faire le choix entre les processus aérobie et anaérobie sont :

- concentration de matière organique à éliminer;
- nécessité d'éliminer de l'azote;
- disponibilité d'espace physique;
- relation entre les frais d'investissement et ceux liés à l'exploitation.

Le tableau 5.4 ci-après renseigne sur les deux procédés en fonction des critères définis.

Tableau 5.4 : Comparaison entre les procédés aérobie et anaérobie en fonction des critères (Tiré de Condorchem, 2022)

	Aérobie	Anaérobie
Concentration matière organique	DCO <3 000 mg/L	DCO <3 000 mg/L
Espace requis	Très grand	Petit
Élimination de nutriments	Possible	Impossible
Coûts d'investissement (CAPEX)	Bas	Élevé
Coûts d'exploitation (OPEX)	Élevé	Bas

Par conséquent, le choix du processus biologique le plus approprié se fait après analyse des caractéristiques du fluide à traiter, le type de processus industriel qui le génère, le degré d'épuration requis et les besoins généraux exprimés. Le tableau 5.5 dessous présente les avantages et les inconvénients des procédés biologiques aérobies et anaérobies.

Tableau 5.5 : Avantages et inconvénients des traitements aérobies et anaérobies (inspiré de Scienceaq, 2022 ; Grandjean, s.d.)

	Mode aérobie	Mode anaérobie
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Processus rapide et efficace qui peut enlever 98 % des contaminants organique - Faible cout d’immobilisation de capital grâce à la rapidité de traitement - Traitement de volumes et flux importants de fluide - Large gamme de contaminants attaquée par les organismes aérobies - Processus généralement exécuté à température ambiante et est beaucoup moins complexe que la digestion anaérobie - Plus facile à gérer 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement de fortes charges de contaminants (1 à 30 g/L) - Faible besoin en azote (N) et en phosphore (P) - Bonne réduction de charges de contaminants, des pathogènes et des odeurs - Génération de biogaz utilisable comme combustible dans les chaudières en remplacement des combustibles fossiles (Gaz naturel ou mazout) - Résidus solides utilisables comme engrais - Application éprouvée dans l'industrie de la brasserie, la distillerie, la production laitière les abattoirs - Faible production de boue, 2 à 5 fois moins qu’en aérobie - Faible consommation d’énergie (environ 25 % d’économie) du fait de l’absence d’équipements d’aération
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une grande quantité d’énergie du fait de l’apport en oxygène par la ventilation, les pompes et les moteurs; - Production de volumes importants de biosolides ou de boues qui nécessitent d’être éliminés ultérieurement - Rendement énergétique de la boue aérobie faible par rapport à celui de la boue anaérobie 	<ul style="list-style-type: none"> - Processus lent, car le temps de séjour long impose de gros volumes de réacteurs - Moins efficace que la digestion aérobie avec 70 à 95 % de contaminants organiques éliminés - Les microorganismes anaérobies attaquent une plus petite gamme de contaminants - Production de mauvaises odeurs (H₂S, mercaptans) - Températures élevées requises (supérieures à 35 °C) - Sédimentation de la biomasse anaérobie plus difficile que celle des boues activées (surface et cout plus élevés) - Plus sensible aux chocs comme les variations de charges et de pH - Période d’ensemencement plus longue, entre 8 à 12 semaines
Coûts	<p>CAPEX : Bas COPEX : Élevé</p>	<p>CAPEX : Élevé COPEX : Bas</p>

Les couts sont très variables d'un procédé à un autre, mais comportent les investissements qui regroupent les dépenses de génie civil et celles des équipements électromécaniques puis les frais d'exploitation. Ces dernières se composent des frais du personnel (entretien, contrôle), des frais énergétiques (pompes,

soufflantes d'air et brassage) et des frais de traitement des boues. Le tableau 5.6 suivant regroupe les coûts de mise en œuvre de quelques modèles de biofiltration.

Tableau 5.6 : Coûts de quelques constructions de biofiltration (adapté de MELCC, 2021)

NOM	Avantages majeurs	Inconvénients majeurs	Coût approximatif
BIONEST	Compact Adapté pour sol imperméable Champ de polissage plus petit	Température eau > 10 °C Besoin d'équipements électriques	8 000 - 10 000 \$
BIOSOR	Non enterré totalement	Changement du média (6 ans)	> 8 000 \$
ECOBIX	Compact Champ de polissage plus petit	Nécessite pompage pour recirculation	8 000 - 10 000 \$
ECOFLO	Média filtrant à durée de vie 10 à 15 ans Pas d'aération	Utilisation de tourbe	7 000 - 11 000 \$
PHYTO-FILTRE	Durée de vie très longue Intégration paysagère Performance excellente	Très peu adapté au climat froid Besoin de barrière de protection	> 10 000 \$
ROTOFIX	Performance d'assainissement	Équipements en mouvement Consommation énergétique.	> 8 000 \$
SYSTEM O	Pas d'électricité Média filtrant sans entretien Forme adaptable des tuyaux	Piézomètres qui sortent du terrain Attention à la ligne de gel dans le sol.	6 000 - 8 000 \$

En somme, les méthodes biologiques aérobies comme anaérobies ont l'avantage d'être efficaces dans le traitement des contaminants organiques, mais pas pour les inorganiques. La voie aérobie dispose d'un spectre d'action plus large et permet une rapidité de traitement de volumes et flux élevés, réduisant ainsi les coûts d'immobilisation de capitaux. De plus, la réaction aérobie est conduite à température ambiante et demeure plus facile à gérer. Cependant, elle est énergivore et produit une grande quantité de boue souvent encombrante.

La voie anaérobie quant à elle est efficace sur de fortes charges de contaminants organiques et produit du biogaz qui peut être valorisé comme combustible. En plus, elle produit des quantités faibles de boue qui peuvent être utilisées comme engrais et consomme peu d'énergie. Néanmoins, les opérations anaérobies sont lentes, nécessitent de grands espaces et attaquent une gamme moindre de contaminants. De plus,

elle produit des odeurs nauséabondes avec des périodes d'ensemencement plus longues et une mauvaise adaptation aux variations de charges et de pH de la solution traitée.

5.2.3 La méthode thermique

Le traitement thermique se compose de deux types : le traitement après conditionnement et le procédé en vrac réservé aux produits liquides. Ce dernier peut être réalisé soit en mode discontinu lors de la pasteurisation de la solution, soit en mode continu pour la stérilisation. Le principe de ces différents modes de transfert thermique varie considérablement d'un procédé à l'autre. Cependant, ils recherchent tous un chauffage rapide et efficace du produit tout en respectant ses caractéristiques. Ses avantages et inconvénients sont au tableau 5.7 ci-dessous.

Tableau 5.7 : Avantages et inconvénients du traitement thermique (inspiré d'Agro-alimentaire, 2009 et Ressources naturelles Canada, 2020)

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Destruction totale des microorganismes - Rendement énergétique élevé, jusqu'à 95 % - La mise en marche, l'arrêt et les réglages sont rapides et simples - Avec l'infrarouge, il n'y a pas besoin d'un fluide intermédiaire pour assurer le transfert thermique et la durée de l'opération est rapide
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Dénaturation de certains composants du fait de la chaleur - Grande consommation d'énergie - Nécessité de disposer d'équipements d'isolation thermique avec un suivi régulier - Détruit les microorganismes de la solution traitée, mais ne les élimine pas - Doit être associée à une technique de filtration comme les membranes - Le traitement n'est pas homogène lorsque la couche de produit traitée est épaisse et induit des importantes dégradations thermiques

5.2.4 Les techniques membranaires

Les méthodes membranaires sont efficaces pour le recyclage de l'eau usée et le traitement de l'eau potable. Selon le diamètre de leurs pores, et donc des particules retenues, elles se composent de membranes de microfiltration (MF), d'ultrafiltration (UF), de nanofiltration (NF) et d'osmose inverse (OI). Le tableau 5.8 dessous synthétise les différentes techniques membranaires en fonction du diamètre des pores, de la pression opératoire, et des espèces retenues.

Tableau 5.8 : Distinction entre les procédés membranaires (adapté de Diaz, 2001)

	Microfiltration MF	Ultrafiltration UF	Nanofiltration NF	Osmose inverse OI
Diamètre des pores	1 µm et 0,1 µm	0,1 µm et 0,01 µm	0,01 µm et 0,001 µm	Inf. 0,001 µm
Plus petites espèces retenues	Colloïdes, microorganismes	Virus, matière organique polymérisée	Ions divalents, petites molécules organiques	La plupart des espèces dissoutes
Pressions opératoires (bar)	0,2 à 1	0,1 à 5	5 à 15	15 à 80
Flux unitaires (L/m ² *h)	100 à 500	50 à 200	15 à 30	15 à 30

Aujourd'hui, l'utilisation des membranes dans le traitement des eaux usées se fait principalement en traitement secondaire ou tertiaire. Dans ce cas, leur principal intérêt est de filtrer les parties bactériologiques, la matière organique et minérale des eaux usées (Diaz, 2001). Dans la filtration sur membrane, ils se regroupent en deux ensembles : la micro et l'ultrafiltration puis la nanofiltration et l'osmose inverse (Lenntech, 2022).

Chacune des techniques comporte des avantages et des inconvénients regroupés dans le tableau 5.9 ci-après. L'un des avantages des procédés membranaires, comparativement aux traitements secondaires biologiques classiques, est de ne pas ajouter de composés chimiques venant enrichir solution finale. Le phosphore et l'azote sont deux bons exemples. En plus de ne pas se servir de ces composés chimiques, les électrotechnologies membranaires sont capables de filtrer ces substances de manière assez efficace.

Tableau 5.9 : Avantages et inconvénients des techniques membranaires (inspiré de Genesis water tech, 2019; Safe drinking water foundation, 2022)

Procédés	Avantages	Inconvénients
Microfiltration et Ultrafiltration	<ul style="list-style-type: none"> - Élimine les turbidités - Ne nécessite pas d'entretien majeur à part les cartouches - Les modèles à membrane tubulaire sont peu encombrants - Requiert peu d'énergie pour son fonctionnement - Débit de perméat élevé : membranes tubulaires et à fibres creuses sont adaptées - Peut être installé dans un espace réduit - Utilise peu ou pas de produits chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne peut pas éliminer les substances dissoutes - Ne retient que particules de diamètre compris entre 1 µm et 0,1 µm : les colloïdes et les microorganismes - Adaptée pour le retrait des matières unicellulaires (bactéries) principalement - Les membranes planes et spiralées sont inadaptées

Procédés	Avantages	Inconvénients
	<ul style="list-style-type: none"> - Moyen écoénergétique pouvant fonctionner à la pression normale - Élimine la totalité des particules minérales et biologiques, les bactéries, les œufs et les germes de la solution traitée - Élimine les particules solides et en suspension ainsi que toutes les matières qui contribuent à la coloration et à l'odeur de la solution - Adaptée pour le traitement des macrosolutés - Adapté pour le recyclage de bains de dégraissage et de fluide de coupe notamment - Réduction des contraintes sur les fibres 	<ul style="list-style-type: none"> - Système tubulaire moins compact et le cout d'installation au m² est élevé
Nanofiltration et Osmose inverse	<ul style="list-style-type: none"> - Enlève la majorité de molécules organiques, presque tous virus, la majorité de la matière organique naturelle et une variété de sels - Élimine les ions divalents qui rendent l'eau dure et les ions multivalents et les molécules supérieures à 200 g/mol comme les colorants et les sucres - Utilise les membranes polymères organiques qui sont faciles à mettre en œuvre, disponibles et peu couteuses - Bonne résistance chimique des membranes inorganiques : adapté pour la filtration des solvants organiques et les solutions agressives - Efficace pour les solutions contenant des substances de faible masse molaire - Adaptée à une utilisation en laboratoire pour la filtration de l'eau - Facilité d'entretien et de nettoyage du système, car il possède très peu de pièces mobiles ou remplaçables - Élimine les contaminants de l'eau, y compris la rouille, les pesticides, les nitrates, les fluorures, les sulfates, les produits pharmaceutiques, les bactéries, l'arsenic et les débris microscopiques - Filtre la solution des minéraux nocifs comme le fer, le manganèse, le sel et des produits chimiques : le fluor et le chlore 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne retiens pas les ions monovalents et les molécules de masse molaire inférieure à 200 g/mol - Faible résistance thermique, chimique et mécanique des membranes organiques - Grande rigidité et fragilité des membranes inorganiques et peu disponibles donc couteuses - Indisponibilité de modèles spiralés avec les membranes inorganiques - Exigence de nettoyage régulier et de renouvellement des membranes : augmentation des couts additionnels - Importante consommation d'énergie par la pompe de gavage - Pertes en eau importante : Le rétentat qui contient tous les sels qui n'ont pas traversé les membranes représente environ 25 % du débit entrant, pour des installations industrielles. - Elle enlève tout ce qui détériore les propriétés de la solution traitée, la rendant trop acide et corrosive pour les appareils et tuyaux - Procédé couteux en exploitation et lent : en moyenne 15 gallons (57 litres) par jour - Remplacement fréquent des membranes - Processus d'installation compliqué, nécessitant l'aide de professionnels

En définitive, les méthodes par voie membranaire présentent un large spectre d'action selon qu'il s'agisse d'une micro, nano, ultrafiltration ou d'une osmose inverse. Elles sont adaptées et efficaces pour le traitement des liquides usagés comme les fluides de coupe. Les avantages ainsi que les désavantages sont

multiformes et fonction des objectifs initiaux de séparation et par conséquent, du type de membrane utilisé.

5.2.5 Le procédé par coalescence et écrémage des huiles

Le système de coalescence et écrémage permet d'épurer les fluides à travers des étapes successives de déshuilage et de coalescence. Pour des applications spécifiques, il est recommandé de joindre aux déshuileurs, un système de rétrocurage à air comprimé pour améliorer le rendement de séparation (CNIDEP, 2020). Néanmoins, il doit nécessairement être couplé à d'autres techniques pour la prise en charge complète de l'ensemble des parasites présents dans les fluides de coupe usagés comme les particules solides et les microorganismes. En outre, ce système induit des investissements de fonctionnement importants dans la maintenance et l'entretien. Ce sont entre autres, les changements et l'élimination réguliers des filtres, la collecte et la gestion des boues de traitement, l'entretien et le nettoyage du système y compris les compresseurs et les pompes. Les avantages et les inconvénients du procédé par coalescence et écrémage sont résumés dans le tableau 5.8 ci-après.

Tableau 5.10 : Avantages et inconvénients du procédé par coalescence et écrémage des huiles (inspiré de CNIDEP, 2020 et Cetim, 2006)

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des besoins et consommations d'huile et d'eau; - Facilité de nettoyage des machines et gain de temps; - Bonne prise en charge des huiles parasites; - Bonne efficacité sur les couches d'huiles surnageantes et les huiles en suspension; - Facilité de mise en œuvre; - Installation immédiatement opérationnelle.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faible efficacité sur l'élimination des particules solides et les microorganismes; - Aucune efficacité sur les huiles émulsionnées; - Grande consommation énergétique; - Production de boue; - Enjeux liés à l'élimination des boues produites; - Nécessité de changer fréquemment les filtres; - Coûts d'entretien élevés.
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement : élevé; - Acquisition : élevé.

5.2.6 Le traitement par centrifugation

La centrifugation provoque la décantation accélérée des particules d'un mélange liquide-solide (Suez, s.d.). La solution à traiter peut être constituée soit de deux phases liquides (émulsion), soit de particules solides en suspension dans un fluide. Les particules plus denses que le liquide vont être projetées vers la périphérie du récipient ou vers l'axe du bol pour celles qui sont plus légères que la phase liquide (Génie-alimentaire, 2012). La séparation de solutions liquides est basée sur leur différence de densité. Cela n'est possible que si le mélange est en suspension et non en solution. Elle permet de clarifier un liquide trouble (comportant des matières en suspension) comme les fluides de coupe usagés ou de séparer les phases légères (huile) et lourdes (eau) d'une émulsion.

Cependant, l'efficacité de ce procédé n'est appréciable qu'en cas d'élimination de l'eau libre sur l'huile et des matières en suspension. Elle est peu recommandée dans le cas des substances dissoutes. De plus, les charges d'entretien et de maintenance restent multiples et élevées. Ces dernières incluent la collecte et la prise en charge des boues de traitement, l'entretien régulier des pompes et de l'ensemble du dispositif. Le tableau 5.11 fait la synthèse des avantages et inconvénients de la méthode.

Tableau 5.11 : Avantages et inconvénients de la centrifugation (inspiré de CNIDEP, 2020; Cetim, 2006 et ID System Fluid, 2019)

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de coût lié l'usage des filtres et leur gestion; - Efficace sur l'eau libre dans l'huile et la matière en suspension; - Facilité et simplicité d'utilisation; - Faible consommation d'eau; - Efficacité de déshuilage supérieure parfois aux procédés par coalescence; - Permet d'extraire les particules, jusqu'à une concentration de 0,05 % en volume pour les petites machines; - Débits de traitement élevés (à partir de 400 L/h); - Perte limitée de matières.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Grande consommation énergétique; - Production de boue contenant des particules métalliques (Matières dangereuses résiduelles); - Coûts d'investissement et de maintenance élevés et difficiles à rentabiliser avec de petits volumes de traitements; - Pannes potentielles dues aux mécanismes en déplacement; - Efficacité limitée à l'eau libre et aux particules en suspension; - Entretien fréquent du système (Rotor et accessoires); - Nécessité de joindre une machine à éjection de solides pour des concentrations en particules > 0,05 %; - En cas de rétention de solides, il est indispensable de démonter le bol régulièrement pour extraire les particules; - Efficacité de déshuilage médiocre sur certaines huiles émulsionnées; - Dans certains cas, la centrifugation peut favoriser le développement de mousse à la surface du bain.
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement : élevé; - Acquisition : élevé (plus de 15 000 euros).

5.2.7 Le traitement par séparation magnétique

Les séparateurs magnétiques peuvent être ajustés pour attirer différents types de matériaux magnétiques à différents niveaux d'intensité. Ils sont employés pour diverses applications dans les usines de déchets, les installations chimiques, les équipements de manutention et bandes transporteuses et les stations de

traitement des liquides usagés. Il a pour avantages d'être facile à nettoyer et à installer. (Imamagnets, 2018) De plus, il élimine les particules de taille submicroscopique et ne nécessite pas de consommables. Il est polyvalent et plus efficace lorsqu'il est utilisé sur les liquides.

Cependant, ce système donne des résultats limités, voire médiocres, sur les particules non ferreuses comme l'aluminium largement utilisés au sein de Verbom Inc. De plus, il est nécessaire d'adjoindre à cette technique, un autre procédé pour accroître son efficacité selon les attentes de la compagnie. En outre, il engendre des charges de fonctionnement importantes en plus des couts d'acquisition élevés. Les atouts ainsi que les désavantages de cette technique sont résumés dans le tableau 5.12 ci-après.

Tableau 5.12 : Avantages et inconvénients de la séparation magnétique (inspiré de Direction de la salubrité et de l'inspection des aliments, s.d.; Simple Signman, 2021 et ID System Fluid, 2019)

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Élimine les minéraux magnétiques naturels tels que la magnétite, ainsi que les limailles d'acier des matériaux de traitement des métaux et les particules de fer; - Plus efficaces lorsqu'utilisés dans les liquides; - Polyvalents, portatifs et simples à utiliser; - Facilité d'installation et de mise en œuvre; - Ne nécessite pas d'usage de consommables.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Grande consommation d'énergie; - Action limitée sur les particules non ferreuses comme l'aluminium; - Nécessité de combiner avec d'autres techniques; - Cout d'acquisition élevé; - Mauvaise résistance à la chaleur (80 °C pour les néodymes); - Fragilité du matériau; - Nécessité d'être entretenu en permanence (laver ou nettoyer pour enlever les matériaux accumulés, ajouter de l'huile aux pièces mobiles); - Nécessité de désactiver les électro-aimants en cas d'urgence.
Couts	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement : Élevé (Entretien, achat d'huile); - Acquisition : élevé (plus de 16 000 \$ pour certains types).

5.3 Définition des critères et du barème d'évaluation

Afin de mener de façon objective cette analyse, deux groupes de critères ont été considérés. D'abord l'efficacité technique de la méthode, qui permet de répondre à l'objectif d'efficience de la démarche. En effet, la viabilité technique de la méthode est indispensable à son déploiement au sein de l'usine U1. Ensuite, s'ajoutent les critères de développement durable : économie, social et environnement. Les poids de ces critères ont été adoptés après discussion avec les ressources au sein de l'entreprise et en relation avec les objectifs à atteindre, à savoir de trouver la meilleure technique de traitement parmi les options disponibles. La prise en compte des domaines économiques, sociaux et environnementaux dans cette analyse permet d'éviter la polarisation des critères comme il est donné de constater très souvent avec les critères économiques qui priment sur les autres dans les processus décisionnels semblables. (Dallaire, 2012) De plus, l'intégration de la durabilité dans la prise de décision est un atout pour Verbom Inc. dans ses défis de réduction des émissions de GES et sa responsabilité sociétale. Dans le but de rendre l'analyse plus précise et d'explicitier les critères, ces derniers ont été détaillés en sous-catégories ou sous-critères. Ils s'inspirent des 16 principes du développement durable explicités par la Loi sur le développement durable du Québec (RLRQ, 2006), du guide pour la prise en compte des principes du développement durable (MELCC, 2009), de (Ndiaye 2022) et de (Dallaire, 2012). Une échelle de 1 à 5 points est adoptée pour évaluer le niveau d'influence de chaque critère. La note 1 est attribuée si l'impact est négatif et 5 si l'effet est favorable.

5.3.1 Critères d'efficacité technique

C'est le critère le plus important, car il constitue un préalable aux autres critères. En effet, selon la volonté des dirigeants de l'usine U1, sans l'efficacité avérée de la solution proposée, il n'y a pas de mise en œuvre possible et donc, il n'y a pas d'effet sur l'environnement ni sur la santé et la sécurité des travailleurs. Ainsi, le procédé adopté doit non seulement préserver les propriétés physicochimiques de mélange traité, mais aussi assurer la rapidité et l'efficacité des tâches. En raison de tous ces facteurs, une pondération de 55 % est attribuée à ce critère qui permet d'évaluer dans chacune des techniques de traitement proposées, les paramètres qui influencent l'efficience des tâches. Il se compose de 3 sous-critères: la capacité à préserver les propriétés physicochimiques du mélange aqueux, la facilité et la rapidité de son exécution et l'autonomie. Ces points sont explicités dans le tableau 5.13 ci-dessous.

Tableau 5.13 : Sous-critères techniques et barème d'évaluation

Sous-critères	Définition	Barème
Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	<p>Apprécier si :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le procédé ne détériore pas la qualité du liquide traité (viscosité, capacité de refroidissement et de lubrification, effets des additifs.) - les propriétés sont conservées, voire améliorées à l'issue du traitement 	<p>Échelle de 1 à 5</p> <p><u>Note 1</u> : Les propriétés du fluide traité sont détériorées. Nécessité d'ajouts importants de constituants pour améliorer la qualité</p> <p><u>Note 5</u> : Les propriétés sont conservées. Le fluide traité est prêt à l'usage</p>
Facilité et rapidité de mise en œuvre	<p>Déterminer si :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la mise en œuvre ne nécessite pas une modification majeure de l'architecture actuelle de l'usine - le procédé s'intègre aisément dans l'environnement actuel avec peu ou pas d'aménagement - le procédé aide à la rapidité et à l'efficacité du travail 	<p>Échelle de 1 à 5</p> <p><u>Note 1</u> : La technique induit des modifications majeures de l'organisation actuelle de l'usine U1 et ne peut pas être fonctionnelle avant 6 mois</p> <p><u>Note 5</u> : Le procédé s'insère avec très peu d'aménagement spatial requis et peut être fonctionnel en 1 mois</p>
Autonomie de la méthode de traitement	<p>Estimer si la technique ne nécessite pas la combinaison d'autres procédés d'appui pour être performante</p>	<p>Échelle de 1 à 5</p> <p><u>Note 1</u> : Le procédé seul ne permet pas d'atteindre les objectifs de traitement. Il nécessite au moins 2 techniques complémentaires</p> <p><u>Note 5</u> : Le procédé est totalement autonome. Il permet seul d'atteindre les objectifs.</p>

5.3.2 Critères de développement durable

L'intégration des critères de développement durable à cette analyse revêt une grande importance, car elle prouve la capacité de l'entreprise à assurer ses activités sur le long terme. En s'appuyant sur la durabilité des services, Verbom Inc. oriente ses investissements vers une stratégie écoresponsable avec une empreinte moindre sur l'environnement. De plus, la prise en considération des critères de développement durable permet de réduire les coûts de production tout en prenant soin de l'environnement et de ses acteurs. Elle assure une meilleure intégration de l'entreprise dans le tissu économique en préservant son image. Pour ces raisons, un poids de 45 % est attribué et équitablement réparti entre les trois critères : l'environnement, l'économie et le social.

➤ Critères environnementaux

Les critères environnementaux sont importants pour chacune des options de traitement du fait de la primauté de la politique environnementale au sein de l'entreprise. En effet, les initiatives et engagements en faveur de la préservation de l'environnement démontrent que Verbom Inc. tient à la sauvegarde d'un environnement sain. De plus, ses activités et investissements sont conditionnés par leur conformité avec les lois et règlements pour la préservation de l'environnement. Ainsi, un poids de 15 % est attribué à ce critère. Il rend compte dans l'analyse, de l'impact des différents procédés sur l'environnement. Il se compose de 3 sous-critères que sont :

- 1) Le rejet de contaminants dans l'environnement : Il permet d'évaluer l'impact de la méthode sur l'environnement à travers sa capacité à rejeter des contaminants solides ou gazeux au cours de son exploitation. Ainsi, la note 1 est attribuée si le procédé rejette des contaminants solides ou gazeux importants dans l'atmosphère et le 5 pour des rejets négligeables.
- 2) La consommation d'énergie : Ce critère détermine le niveau de besoin énergétique nécessaire au fonctionnement optimal de la méthode de traitement. La note 1 montre que la consommation d'énergie est importante et continue tout au long de processus d'utilisation. La note 5 indique que le procédé est peu énergivore ou qu'il produit de l'énergie capable de compenser en partie ou en totalité sa consommation.
- 3) La facilité de gestion et d'élimination des déchets produits : Il mesure les quantités de déchets produites par la technique ainsi que la complexité de leur élimination. La note 1 sera attribuée si la technique produit de grandes quantités de déchets difficiles à traiter et que sa gestion nécessite la mise en œuvre de procédés spécifiques ; engendrant des coûts supplémentaires. La note 5 indique que la technique produit peu ou pas de déchets et que ces derniers peuvent se gérer aisément sans coûts additionnels.

Le tableau 5.14 ci-après fait le résumé des sous-critères environnementaux et le barème de mesure.

Tableau 5.14 : Critères environnementaux et barèmes

Sous-critères	Définition	Barème
Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	Évaluer la capacité de la méthode à rejeter des contaminants solides ou gazeux en cours d'utilisation (boues, fumées, particules)	Échelle de 1 à 5 : <u>Note 1</u> : La technique produit des déchets et émissions atmosphériques importantes <u>Note 5</u> : Elle produit peu ou pas de déchets
Consommation d'énergie	Déterminer le niveau de dépense énergétique nécessaire au fonctionnement optimal	Échelle de 1 à 5 : <u>Note 1</u> : Le procédé est énergivore <u>Note 5</u> : Il consomme peu ou pas d'énergie et produit de l'énergie en compensation de sa consommation
Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	Mesurer la production quantitative et qualitative de déchets par la technique de même que leur facilité de gestion	Échelle de 1 à 5 : <u>Note 1</u> : Les déchets sont volumineux et nécessitent des moyens spécifiques pour être éliminés <u>Note 5</u> : Les déchets sont peu volumineux et peuvent se gérer aisément

➤ Critères économiques

L'étude étant réalisée dans le contexte d'une entreprise où la rentabilité est primordiale, le critère économique est pris en considération dans cette analyse. Il fait référence d'une part aux dépenses d'investissement (COPEX) engagées pour la mise en œuvre du procédé et de l'autre, les charges de fonctionnement. Ainsi, la meilleure des techniques de traitement doit nécessiter peu d'investissement pour sa mise en œuvre et peu de charges de fonctionnement pour l'entreprise. Une pondération de 15 % est donc attribuée à ce critère avec un barème de mesure à deux échelles. Une partie numérique graduée de 1 à 5 estime les coûts d'acquisition et de fonctionnement de la méthode et l'autre, mesure de façon qualitative le sous-critère étudié. Ce critère se subdivise en trois (3) sous-critères :

- 1) L'investissement initial : Il renvoie au coût d'achat du procédé. C'est-à-dire l'ensemble des dépenses en équipements et en logiciels engagées pour acquérir la technique. Suivant l'axe quantitatif, la note la plus basse 1 indique que l'investissement initial est supérieur à 50 000 \$ et la note 5 est donnée si l'achat est inférieur à 20 000 \$. Sur l'axe qualitatif, la disponibilité des équipements et les facilités d'approvisionnement qui influencent les coûts d'acquisition sont évaluées. La figure 5.2 ci-après schématise ce barème à double échelle pour le sous-critère investissement initial.

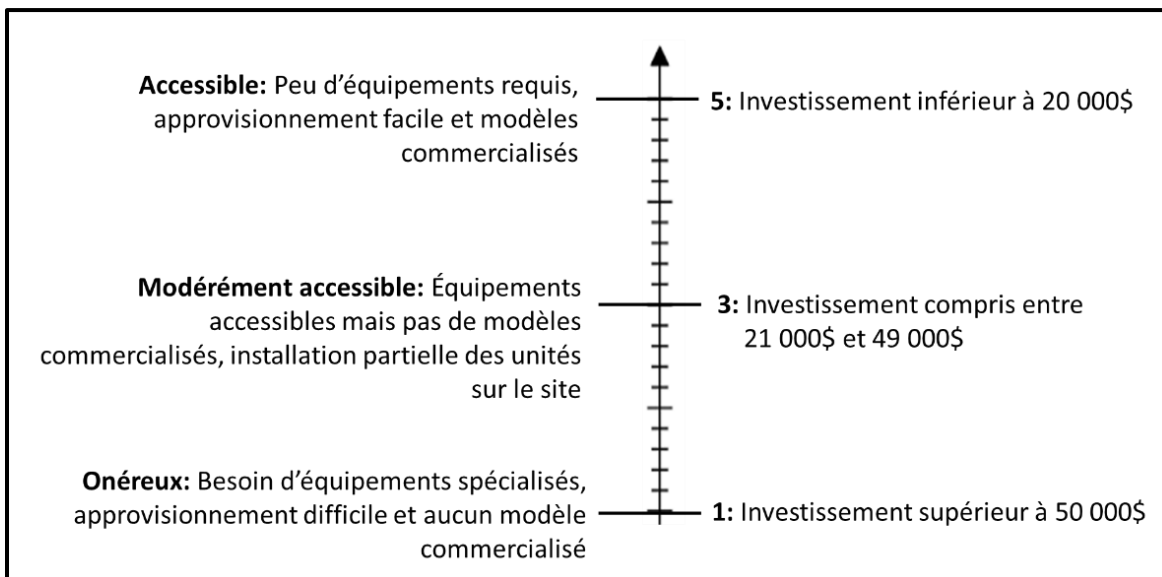


Figure 5.2 : Barème d'évaluation de l'investissement initial

2) Les charges d'exploitation : Ce critère évalue les coûts induits par le fonctionnement du procédé. Il inclut les coûts de maintenance, des intrants et des coûts variables. La figure 5.3 ci-dessous présente les échelles de mesure.

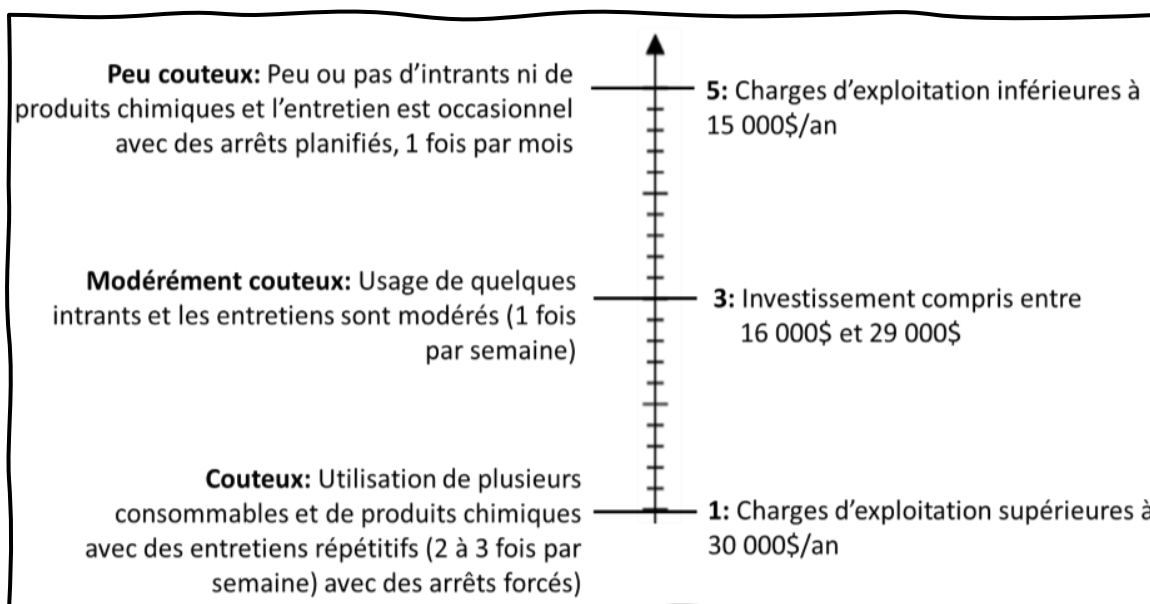


Figure 5.3 : Barème d'évaluation des charges d'exploitation

Le tableau 5.15 synthétise les critères économiques avec les barèmes associés.

Tableau 5.15 : Résumé des critères économiques

Sous-critères	Définition	Barème
Investissement initial	Ce critère renvoie au montant des coûts liés aux dépenses engagées (Équipements, humains) avant la mise en production du procédé	Échelle de 1 à 5 Le pointage 1 indique des investissements initiaux supérieurs à 50 000 \$ ou très élevés et 5 s'ils sont inférieurs à 10 000 \$ ou faibles. Ou bien Échelle qualitative : d'onnéreux à accessible <u>Onéreux</u> : Le procédé nécessite l'acquisition d'équipements spécifiques et difficiles à se procurer ; avec absence de modèles commercialisés <u>Accessible</u> : Le procédé requiert peu d'équipements spécialisés, l'approvisionnement est facile et des modèles commercialisés existent
Coûts de fonctionnement	Estimer les coûts induits par le fonctionnement du procédé. Ils incluent les coûts de maintenance, le coût des intrants, la main-d'œuvre, les coûts variables.	Échelle de 1 à 5 <u>Note 1</u> : Coûts de fonctionnement supérieurs à 30 000 \$ l'année <u>Note 5</u> : Coûts inférieurs à 20 000 \$ Ou bien Échelle qualitative de couteux à peu couteux <u>Couteux</u> : La technique utilise plusieurs consommables, produits chimiques avec des entretiens répétitifs <u>Peu couteux</u> : La technique requiert peu ou pas d'intrants avec moins d'entretien pendant son fonctionnement

➤ Critères sociaux

Le critère social est pris en considération dans cette analyse avec une pondération de 15 %. Ce poids attribué vient de l'importance qu'accorde Verbom Inc. à la santé et sécurité dans son cadre de travail à travers l'adoption et le respect strict d'une politique SST. Cette dernière, conforme aux exigences du règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST), met un accent particulier sur la santé et la sécurité des agents sur leur lieu de travail. Outre les aspects de santé et sécurité, le critère social se compose aussi de l'adhésion des parties intéressées à la mise en œuvre du procédé ainsi que les nuisances internes et externes liées à l'exploitation de la technique. Une échelle de notation graduée de 1 à 5 est utilisée pour évaluer ces sous-critères sociaux. Le tableau 5.16 ci-après définit les différents sous-critères ainsi que leur barème de mesure.

Tableau 5.16 : Sous-critères sociaux et barème de mesure

Sous-critères	Définition	Barème
Santé et sécurité du travail	Déterminer le niveau de sécurité qu'offre le procédé de traitement pendant l'exécution des tâches, notamment l'absence d'émissions dangereuses pour la peau et l'inhalation ou de rejets divers	Échelle de 1 à 5 <u>Note 1</u> : La technique présente des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs : Émission de gaz toxique, de particules fines, de résidus dangereux <u>Note 5</u> : Les travailleurs agissent en toute sécurité, car la technique est bien connue
Acceptabilité	Sonder l'adhésion des parties intéressées par l'utilisation des fluides de coupe et la gestion des rejets liquides résiduels. Les parties intéressées englobent les travailleurs, les sous-traitants, la municipalité de Valcourt, les inspecteurs du ministère	Échelle de 1 à 5 <u>Note 1</u> : Au moins 2 des parties intéressées n'adhèrent pas à la technique de traitement <u>Note 5</u> : Tous les acteurs adhèrent à la mise en œuvre de la technique
Nuisances (odeurs, bruits)	Estimer les nuisances générées par le procédé dans la biosphère aussi bien à l'intérieur de l'usine que dans le voisinage immédiat	Échelle de 1 à 5 <u>Note 1</u> : Les nuisances sont considérables et handicapantes pour les travailleurs et les habitants voisins du site <u>Note 5</u> : Le procédé produit peu ou pas de nuisance

5.3.3 Synthèse des critères et barèmes d'appréciation

L'analyse est menée avec 4 critères, à savoir l'environnement, le social, l'économie et l'efficacité technique de la méthode. Chacun de ces critères est subdivisé en 3 sous-critères permettant de mieux cerner le critère étudié. Ainsi, un barème d'appréciation est déterminé et appliqué pour chaque sous-critère. L'ensemble de ces données est synthétisé dans l'annexe 4.

5.4 Analyse des options de traitement

Après l'analyse des avantages et inconvénients de chacune des options de traitement et la définition des critères ainsi que l'identification des barèmes d'appréciation, il est opportun de passer en revue l'ensemble des techniques à travers le processus de notation et d'évaluation.

5.4.1 Description du processus de notation et grille de référence

La notation des différentes options de traitement en vue de sélectionner la plus adaptée au contexte de l'entreprise se fait d'abord et principalement sur la base de l'évaluation et la comparaison des avantages

et inconvénients de chacune d'elles. Ensuite, elle tient compte des besoins exprimés par l'entreprise ; à savoir la réemployabilité de la solution traitée. La démarche consiste à vérifier la réponse que donne le procédé noté à chacun des critères retenus pour l'analyse dans la matrice des avantages et inconvénients. Par exemple, si la réponse au critère évalué se situe dans le spectre des inconvénients, la note du procédé pour ce critère tend vers le minimum qui est 1. Si au contraire la réponse reste dans le champ des avantages, la note penchera vers le maximum de 5. À ces notes, il est appliqué la pondération du critère donné. Ainsi, la note pondérée d'un sous-critère de développement durable est comprise entre 0,15 et 0,75 point quand celle d'un sous-critère technique varie entre 0,55 et 2,75 points tel que présenté sur le tableau 5.17 ci-après.

Tableau 5.17 : Grille de référence de la notation

Critères	Sous-critères	Poids	Note mini	Note mini pondérée	Note maxi	Note maxi pondérée
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	0,15	1	0,15	5	0,75
	Consommation d'énergie		1	0,15	5	0,75
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits		1	0,15	5	0,75
Économie	Investissement initial	0,15	1	0,15	5	0,75
	Couts de fonctionnement		1	0,15	5	0,75
Social	Santé et sécurité du travail	0,15	1	0,15	5	0,75
	Acceptabilité		1	0,15	5	0,75
	Nuisances (odeur, bruit)		1	0,15	5	0,75
Sous-total Développement durable		0,45	8	1,2	40	6
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	0,55	1	0,55	5	2,75
	Facilité et rapidité de mise en œuvre		1	0,55	5	2,75
	Autonomie de la méthode de traitement		1	0,55	5	2,75
Sous-total Efficacité technique		0,55	3	1,65	15	8,25
Grand total		1	11	2,85	55	14,25

5.4.2 Analyse du procédé physicochimique

Le traitement physicochimique débute avec l'étape primaire par coagulation qui peut être menée de deux façons, à savoir par voie chimique et électrochimique. Ensuite, la floculation ou désinfection peut aussi se mener par le chlore ou par rayonnement UV. L'analyse des avantages et inconvénients montre des atouts utiles de la voie électrochimique par rapport à l'option chimique. Notamment, la facilité et la

simplicité qu'offre le système dans son utilisation, la boue produite est non dangereuse et de faibles quantités et l'action sur une gamme variée de contaminants. Néanmoins, elle requiert des ajustements de pH et un apport important en énergie. De même, la floculation par les rayons UV ne présente aucun effet nocif pour la santé et la sécurité des employés. De plus, elle n'utilise pas de produits chimiques lors de son emploi avec un temps de contact court et un besoin en espace faible. En revanche, elle montre des limites quand la concentration de matières en suspension est élevée.

Pris dans son ensemble, la méthode de traitement physicochimique comporte nombre d'atouts liés à son utilisation dans l'épuration des eaux usées industrielles. Sur le plan technique, il démontre une bonne capacité à éliminer plus rapidement les particules fines, les microorganismes et virus présents dans la solution ainsi qu'une grande flexibilité face aux variations de charges traitées. Cependant, il nécessite l'association d'autres méthodes pour être efficace. Au niveau environnemental, il produit peu de boue et les émissions dans l'air sont limitées, voire inexistantes. Néanmoins, la diversité et la complexité des produits chimiques peuvent rendre les résidus difficiles à manœuvrer. Sur le plan économique, il est certes peu coûteux en investissement initial, mais les charges d'exploitation incluant la main-d'œuvre, les adjuvants chimiques et l'entretien s'avèrent élevées. Enfin, sur le plan social, son fonctionnement génère peu de nuisance pour les travailleurs. Néanmoins, il nécessite de disposer d'une main-d'œuvre hautement qualifiée pour les opérations de dosage des coagulants et le suivi et contrôle strict des différentes phases et l'usage de produits chimiques soulève quelques appréhensions et enjeux de santé-sécurité principalement lors de leur manipulation. De ce fait, l'acceptabilité des différentes parties prenantes interrogées reste mitigée. En effet, plusieurs d'entre elles sont réticentes quant à l'usage des produits chimiques en milieu de travail alors que d'autres sont confiantes avec l'application des mesures de prévention et de précaution. L'analyse de ces facteurs favorables comme défavorables conduit à la matrice de notation présentée dans le tableau 5.18 ci-dessous.

Tableau 5.18 : Matrice de notation de la méthode physicochimique

Critères	Sous-critères	Note	Poids	Note pondérée
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	4	0,15	0,6
	Consommation d'énergie	3		0,45
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	4		0,6
Économie	Investissement initial	4	0,15	0,6
	Coûts de fonctionnement	1		0,15
Social	Santé et sécurité du travail	3	0,15	0,45
	Acceptabilité	2		0,3
	Nuisances (odeur, bruit)	5		0,75
Sous-total Développement durable		26	0,45	3,9
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	4	0,55	2,2
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	4		2,2
	Autonomie de la méthode de traitement	2		1,1
Sous-total Efficacité technique		10	0,55	5,5
Grand total		35	1	9,4

5.4.3 Analyse des procédés biologiques

Les procédés biologiques se composent essentiellement des voies aérobie et anaérobie. Elles ont l'avantage d'être efficaces dans le traitement des contaminants organiques, mais pas pour les inorganiques.

Sur le plan technique, la voie aérobie dispose d'un spectre d'action plus large; c'est-à-dire que les bactéries aérobies éliminent une plus grande variété de contaminants en comparaison avec les microorganismes anaérobies. En plus, elle traite beaucoup plus rapidement des volumes et flux de matières élevés, réduisant ainsi les coûts d'immobilisation de capitaux. Enfin, la voie aérobie reste plus facile à gérer.

La voie anaérobie quant à elle est efficace sur de fortes charges de contaminants organiques avec un besoin réduit en azote et en phosphore. Elle fournit un bon rendement de réduction de contaminants et de pathogènes. Néanmoins, son spectre d'action est moins large et le processus est bien plus lent en plus de nécessiter de grands espaces pour son implantation. De plus, l'efficacité du traitement anaérobie est moindre, de 70 à 95 % alors que le mode aérobie l'est à 98 %. En outre, les bactéries anaérobies

nécessitent des périodes d'ensemencement plus longues et une mauvaise adaptation aux variations de charges et de pH de la solution traitée.

Sur le plan économique, les réactions aérobies se produisent à température ambiante, évitant ainsi des apports supplémentaires en énergie pour le chauffage. Le coût de l'investissement est faible et sa mise en œuvre produira des gains économiques pour l'entreprise. Cependant, les charges de fonctionnement sont onéreuses. En mode anaérobie cependant, l'investissement est plus élevé, mais les charges de fonctionnement restent faibles.

Sur le plan social, le mode aérobie engendre peu de nuisances alors que le mode anaérobie est source de fortes odeurs nauséabondes, voire toxiques, avec la formation de dioxyde de soufre (H_2S). Ce fait peut soulever des enjeux de santé et sécurité pour les travailleurs du site et le voisinage immédiat. Ainsi, le mode anaérobie rassemble peu d'adhésion des parties intéressées pour sa mise en œuvre comparée au traitement aérobie.

Sur le plan environnemental, la voie aérobie est énergivore à cause de la nécessité de fournir de l'oxygène par la ventilation, les pompes et les moteurs. Elle produit un volume important de boue souvent encombrante qui nécessite d'être traitée à son tour. Le mode anaérobie produit des résidus solides qui peuvent servir comme engrais et le volume est moindre que les boues aérobies. Elle consomme peu d'énergie, environ 25 % d'économie d'énergie.

Toutes ces raisons justifient les notes attribuées à chacun des critères et résumées dans le tableau 5.19 ci-après.

Tableau 5.19 : Matrice de notation des méthodes biologiques

Critères	Sous-critères	Notation		Poids	Note pondérée	
		Aérobie	Anaérobie		Aérobie	Anaérobie
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	1	3	0,15	0,15	0,45
	Consommation d'énergie	2	5		0,3	0,75
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	3	4		0,45	0,6
Économie	Investissement initial	4	2	0,15	0,6	0,3
	Coûts de fonctionnement	1	4		0,15	0,6
Social	Santé et sécurité du travail	3	3	0,15	0,45	0,45
	Acceptabilité	3	1		0,45	0,15
	Nuisances (odeur, bruit)	4	1		0,6	0,15
Sous-total Développement durable		21	23	0,45	3,15	3,45
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	3	3	0,55	1,65	1,65
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	3,5	1,5		1,925	0,825
	Autonomie de la méthode de traitement	2	2		1,1	1,1
Sous-total Efficacité technique		8,5	6,5	0,55	4,675	3,575
Grand total		34	33	1	7,825	7,025

5.4.4 Analyse des procédés membranaires

Les procédés membranaires se composent de la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et de l'osmose inverse. Ils peuvent être utilisés individuellement ou bien envisagés à divers niveaux de la chaîne de traitement comme méthode complémentaire. Le tableau 5.20 présente les procédés membranaires applicables en fonction du niveau de traitement. Ils sont adaptés et employés dans le traitement des liquides usés comme les fluides de coupe.

Tableau 5.20 : Application des techniques membranaires par niveau de traitement (tiré de Diaz, 2001)

Niveau de traitement	Techniques membranaires appliquées
Après la sédimentation primaire	UF, MF
Dans le traitement physicochimique de coagulation floculation	MF
En traitement secondaire, inclus dans le bassin de boues activées	MF
En traitement secondaire, conçu comme un ouvrage remplaçant le décanteur secondaire	UF, MF, OI
En traitement tertiaire à la suite d'une décantation secondaire	UF, MF, NF, OI

De plus, les avantages ainsi que les désavantages sont multiformes et fonction des objectifs initiaux de séparation et par conséquent, du type de membrane utilisé.

Sur le plan de l'efficacité technique, les membranes MF et UF éliminent les turbidités et n'impliquent pas d'entretiens majeurs ni de grands espaces pour leur installation. De plus, leur productivité est importante avec des différences de pressions faibles et lorsqu'elles sont utilisées en désinfection, elles permettent l'élimination de matières en suspension et le maintien des taux de DCO et DBO₅ respectivement en dessous de 35 mg/L et 5 mg/L (Diaz, 2001). En outre, l'ultrafiltration est adaptée pour recyclage de bains de dégraissage et de fluide de coupe. Cependant, ces membranes ne retiennent que les particules de taille relativement élevée comme les colloïdes et les microorganismes et pas les substances dissoutes.

Les membranes NF et OI quant à elles sont utilisées pour l'élimination de petites particules comme les sels, la matière organique naturelle, les virus et les ions divalents. Néanmoins, elles nécessitent des pressions élevées et leur productivité est bien plus faible. (Lenntech, 2022) De plus, elles imposent nécessairement un prétraitement par filtration et un traitement complémentaire de la pollution complémentaire résiduelle (Ndiaye, 2022).

Sur le plan environnemental, l'énergie requise pour toutes les méthodes membranaires est celle nécessaire pour pomper le liquide dans la membrane. Cette quantité d'énergie utilisée est minime comparée à d'autres techniques comme la thermique. De plus les techniques membranaires ne rejettent presque pas de déchets solides ni gazeux dans l'environnement.

Sur le plan social, les techniques membranaires assurent un cadre de travail sécuritaire pour les intervenants et n'émettent aucune nuisance tant sonore qu'olfactive. Elles fédèrent donc l'assentiment de la majorité des parties intéressées.

Sur le plan économique, les membranes en général ont un coût d'installation au m² élevé rendant les investissements initiaux onéreux. La fréquence de nettoyage et d'entretien des membranes MF et UF est moindre en comparaison avec les NF et l'OI. Néanmoins, les systèmes sont faciles à entretenir et à nettoyer du fait de la présence de peu de pièces mobiles ou remplaçables.

Alors, l'analyse de tous ces paramètres en lien avec les avantages et les inconvénients de chaque procédé membranaire conduisent à l'attribution des notes à chacun des critères et sont synthétisés dans le tableau 5.21 ci-après.

Tableau 5.21 : Synthèse de la notation des procédés membranaires

Critères	Sous-critères	Notation		Poids	Note pondérée	
		MF/UF	NF/OI		MF/UF	NF/OI
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	4,5	4,5	0,15	0,675	0,675
	Consommation d'énergie	4,5	3		0,675	0,45
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	4	4		0,6	0,6
Économie	Investissement initial	3	3	0,15	0,45	0,45
	Coûts de fonctionnement	3	2		0,45	0,3
Social	Santé et sécurité du travail	4	4	0,15	0,6	0,6
	Acceptabilité	4	4		0,6	0,6
	Nuisances (odeur, bruit)	4	4		0,6	0,6
Sous-total développement durable		31	28,5	0,45	4,65	4,275
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	4	2	0,55	2,2	1,1
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	4	3		2,2	1,65
	Autonomie de la méthode de traitement	3	2		1,65	1,1
Sous-total efficacité technique		11	7	0,55	6,05	3,85
Grand total		42	34,5	1	10,7	8,125

5.4.5 Analyse du procédé thermique

Le traitement des liquides, dont les fluides de coupe usagés par voie thermique, se fait principalement par le procédé en vrac. Deux avenues sont empruntées à cette fin : le mode discontinu et le mode continu, chacune avec ses avantages et ses inconvénients et ses inconvénients. Ainsi, sur le plan technique, le procédé thermique détruit tous la plupart des microorganismes et assure une facilité de réglage. Cependant, sa mise en œuvre nécessite l'installation d'équipements de chauffage et d'isolation importants et il conduit à la dénaturation de certains composants impactant ainsi les propriétés physicochimiques de la solution traitée. De plus, du fait qu'il n'élimine pas les microorganismes de la solution traitée thermiquement, l'association d'une technique de filtration comme les membranes s'avère indispensable.

Sur le plan environnemental, la voie thermique émet peu de composants indésirables dans l'atmosphère et le rendement énergétique de transfert de chaleur est élevé d'environ 95 %. Néanmoins, elle consomme de grandes quantités d'énergie pour assurer le chauffage et le maintien des températures pendant l'opération. Sur le plan social, des risques de brûlure accidentelle peuvent survenir sur le lieu de travail, mais peuvent être contrôlés et maîtrisés par l'application de mesures de prévention et de précaution. En outre, elle n'entraîne aucune nuisance pour les travailleurs du site et le voisinage. Sur le plan économique,

la méthode nécessite des investissements importants pour l'acquisition des équipements de chauffage et d'isolation thermique. Cependant, les charges de fonctionnement et d'exploitation sont moindres grâce à la facilité et la simplicité de réglage, de mise en marche et d'arrêt qui ne nécessitent pas de la main-d'œuvre spécifique ni de technologies complexes. L'analyse comparative des avantages et inconvénients au regard des critères d'évaluation permet d'attribuer les notes résumées dans le tableau 5.22 ci-dessous.

Tableau 5.22 : Notation du procédé par voie thermique

Critères	Sous-critères	Note	Poids	Note pondérée
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	4,5		0,675
	Consommation d'énergie	1	0,15	0,15
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	3		0,45
Économie	Investissement initial	2	0,15	0,3
	Coûts de fonctionnement	4		0,6
Social	Santé et sécurité du travail	2,5		0,375
	Acceptabilité	3	0,15	0,45
	Nuisances (odeur, bruit)	4		0,6
Sous-total Développement durable		24	0,45	3,6
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	1	0,55	0,55
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	2		1,1
	Autonomie de la méthode de traitement	2		1,1
Sous-total Efficacité technique		5	0,55	2,75
Grand total		29	1	6,35

5.4.6 Analyse du procédé par coalescence et écrémage des huiles

La synthèse des forces et faiblesses du procédé de traitement par coalescence et écrémage des huiles fait ressortir plusieurs avantages de celui-ci, mais également des inconvénients qu'il importe de considérer. Du point de vue technique, ce procédé démontre une bonne prise en charge des huiles parasites, spécifiquement les couches surnageantes et les portions en suspensions. Sa facilité de mise en œuvre ainsi que son opérationnalité immédiate demeurent des atouts importants. Cependant, elle fournit une efficacité limitée, voire médiocre, pour les particules solides et les microorganismes qui se développent dans l'huile traitée. De plus, elle n'a aucune efficacité sur les huiles émulsionnées. Utilisée seule, elle ne permet pas d'atteindre les objectifs attendus par l'entreprise. Elle nécessite donc la mise en œuvre d'une

technique complémentaire pour améliorer sa performance dans le contexte de l'entreprise. (CNIDEP, 2020 et Cetim, 2006)

Sur le plan du développement durable, elle émet modérément des produits indésirables dans l'environnement et l'élimination des déchets issus de son fonctionnement est relativement facile. De plus, elle produit peu de nuisance et sa mise en œuvre se fait dans des conditions de santé et de sécurité acceptables pour les opérateurs et l'ensemble des employés du site. Néanmoins, elle engendre des consommations d'énergie importantes avec les incidences indirectes sur la destruction des ressources. En outre, les coûts d'investissements pour son acquisition ainsi que les charges de fonctionnement sont élevés. (CNIDEP, 2020 et Cetim, 2006)

La combinaison de l'ensemble de ces facteurs favorables et défavorables permet de produire la matrice de notation fournie au tableau 5.23 ci-après.

Tableau 5.23 : Matrice de notation du procédé par coalescence et écrémage des huiles

Critères	Sous-critères	Notation	Poids	Note pondérée
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	2,5	0,15	0,375
	Consommation d'énergie	2		0,3
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	2,5		0,375
Économie	Investissement initial	2	0,15	0,3
	Coûts de fonctionnement	2		0,3
Social	Santé et sécurité du travail	3,5	0,15	0,525
	Acceptabilité	4		0,6
	Nuisances (odeur, bruit)	3		0,45
Sous-total développement durable		21,5	0,45	3,225
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	2	0,55	1,1
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	4		2,2
	Autonomie de la méthode de traitement	2		1,1
Sous-total efficacité technique		8	0,55	4,4
Total		29,5	1	7,625

5.4.7 Analyse du traitement par centrifugation

La centrifugation permet de traiter à la fois les mélanges liquides-solides et les émulsions; c'est-à-dire le mélange de deux phases liquides en agissant sur la densité de chacun des éléments à séparer. Au niveau de l'efficacité technique, elle permet d'extraire les particules dont la concentration peut atteindre 0,05 % du volume traité avec une simplicité et une facilité d'utilisation. Ses performances de déshuilage sont relativement supérieures en comparaison avec la coalescence. Néanmoins, elle montre des résultats moindres pour les substances dissoutes et sur certaines huiles émulsionnées. En plus, pour des solutions dont la concentration est supérieure à 0,05 %, il est indispensable d'adjoindre une machine à éjection afin de prendre en charge efficacement les rejets. Par ailleurs, le système peut favoriser la création de mousse à la surface de la solution traitée avec des possibilités de pannes récurrentes du système. (CNIDEP, 2020; Cetim, 2006 et ID System Fluid, 2019)

Au niveau environnemental, la centrifugation utilise peu d'eau dans son fonctionnement, mais engendre de grandes consommations d'énergie. Elle produit de la matière dangereuse résiduelle; notamment de la boue contenant des particules métalliques qui nécessitent des dispositions particulières pour leur transport et leur gestion. Sur le plan économique, la technique est onéreuse tant à l'acquisition qu'au fonctionnement. L'investissement initial pourrait atteindre 15 000 euros et, pendant son fonctionnement, elle est sujette à des séances régulières d'entretien du rotor et de ses accessoires. L'ensemble des coûts restent difficiles à rentabiliser pour les volumes relativement faibles, à l'échelle d'une entreprise pour son utilisation interne. Cependant, elle pourrait être rentable pour une entreprise commerciale traitant de grands volumes. Sur le plan social, la matière dangereuse résiduelle produite peut être source de préoccupation en matière de santé et de sécurité et donc de l'acceptabilité de son implémentation sur le site. (CNIDEP, 2020; Cetim, 2006 et ID System Fluid, 2019)

L'analyse comparée des avantages et des inconvénients permettent d'attribuer de façon objective des notes à chaque critère. Le tableau 5.24 ci-dessous présente cette matrice.

Tableau 5.24 : Matrice de notation du procédé par centrifugation

Critères		Sous-critères	Notation	Poids	Note pondérée
Environnement		Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	2,5	0,15	0,375
		Consommation d'énergie	1,5		0,225
		Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	2		0,3
Économie		Investissement initial	2	0,15	0,3
		Coûts de fonctionnement	2		0,3
Social		Santé et sécurité du travail	3	0,15	0,45
		Acceptabilité	3		0,45
		Nuisances (odeur, bruit)	4		0,6
Sous-total développement durable			20	0,45	3
Efficacité technique		Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	3,1	0,55	1,705
		Facilité et rapidité de mise en œuvre	4		2,2
		Autonomie de la méthode de traitement	2		1,1
Sous-total efficacité technique			9,1	0,55	5,005
Total			29,1	1	8,005

5.4.8 Analyse du traitement par séparation magnétique

La séparation magnétique est populaire dans le secteur industriel et le domaine du traitement des liquides usagés en particulier, du fait de sa polyvalence et de sa simplicité de mise en œuvre. Sur le plan technique, ses performances sont meilleures lorsqu'appliquées au traitement des liquides plus qu'aux solides; notamment pour l'élimination des limailles d'acier et des particules de fer. Elle n'utilise pas de consommables tels que les filtres et jouit d'une facilité d'installation et de mise en œuvre avérée. En revanche, elle est peu adaptée aux matériaux non ferreux comme l'aluminium, fortement présent sur le site de cette étude et les fractions biologiques. De ce fait, elle nécessite la mise en œuvre d'une technique de traitement complémentaire pour prendre en charge l'ensemble des composants indésirables en présence. En outre, les matériaux utilisés dans sa constitution sont fragiles et résistent moins à la chaleur. C'est le cas par exemple des aimants néodymes pour lesquels les performances déclinent au-delà de 80 °C. Par ailleurs, cette technique demande de l'entretien en permanence comme le lavage et nettoyage en vue d'enlever les matériaux accumulés sur la face de l'aimant. (Direction de la salubrité et de l'inspection des aliments, s.d.; Signman, 2021 et ID System Fluid, 2019)

Sur le plan du développement durable, elle rejette peu de matières dangereuses dans l'environnement et les déchets (solides) retirés de la solution traitée sont pris en charge par le système de gestion des matières résiduelles. L'équipement assure un environnement de travail sécuritaire et émet très peu de nuisances sonores et de vibrations. Cependant, elle consomme fortement de l'énergie; surtout avec les électro-aimants. Les charges liées à l'entretien répétitif et à l'achat et l'usage d'huile pendant son utilisation rendent ce procédé onéreux, de même que l'investissement initial d'acquisition qui dépasse 16 000 \$ pour certaines constructions. (Direction de la salubrité et de l'inspection des aliments, s.d.; Signman, 2021 et ID System Fluid, 2019)

L'ensemble de ces facteurs favorables comme défavorables au regard des paramètres d'évaluation conduisent à la grille de notation récapitulée dans le tableau 5.25 ci-après.

Tableau 5.25 : Matrice de notation du procédé de séparation magnétique

Critères	Sous-critères	Notation	Poids	Note pondérée
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	3		0,45
	Consommation d'énergie	1,25	0,15	0,187 5
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	3		0,45
Économie	Investissement initial	1	0,15	0,15
	Coûts de fonctionnement	1		0,15
Social	Santé et sécurité du travail	3,25		0,487 5
	Acceptabilité	3,5	0,15	0,525
	Nuisances (odeur, bruit)	4		0,6
Sous-total développement durable		20	0,45	3
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	2,5		1,375
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	3,5	0,55	1,925
	Autonomie de la méthode de traitement	2		1,1
Sous-total efficacité technique		8	0,55	4,4
Total		28	1	7,4

5.5 Résultats et prise de position

Dans le cadre de cette étude, neuf options de traitement ont été analysées selon leur efficacité technique, leur impact environnemental, les aspects liés au social et à l'économie. Il s'agit des méthodes :

- physicochimique ;
- biologique par voie aérobie ;

- biologique par voie anaérobie ;
- membranaire par microfiltration et ultrafiltration ;
- membranaire par nanofiltration et osmose inverse ;
- thermique ;
- magnétique ;
- par coalescence et écrémage des huiles ;
- par centrifugation.

Les résultats du processus de notation sont synthétisés graphiquement sur la figure 5.4 et détaillés dans le tableau 5.26 ci-après.

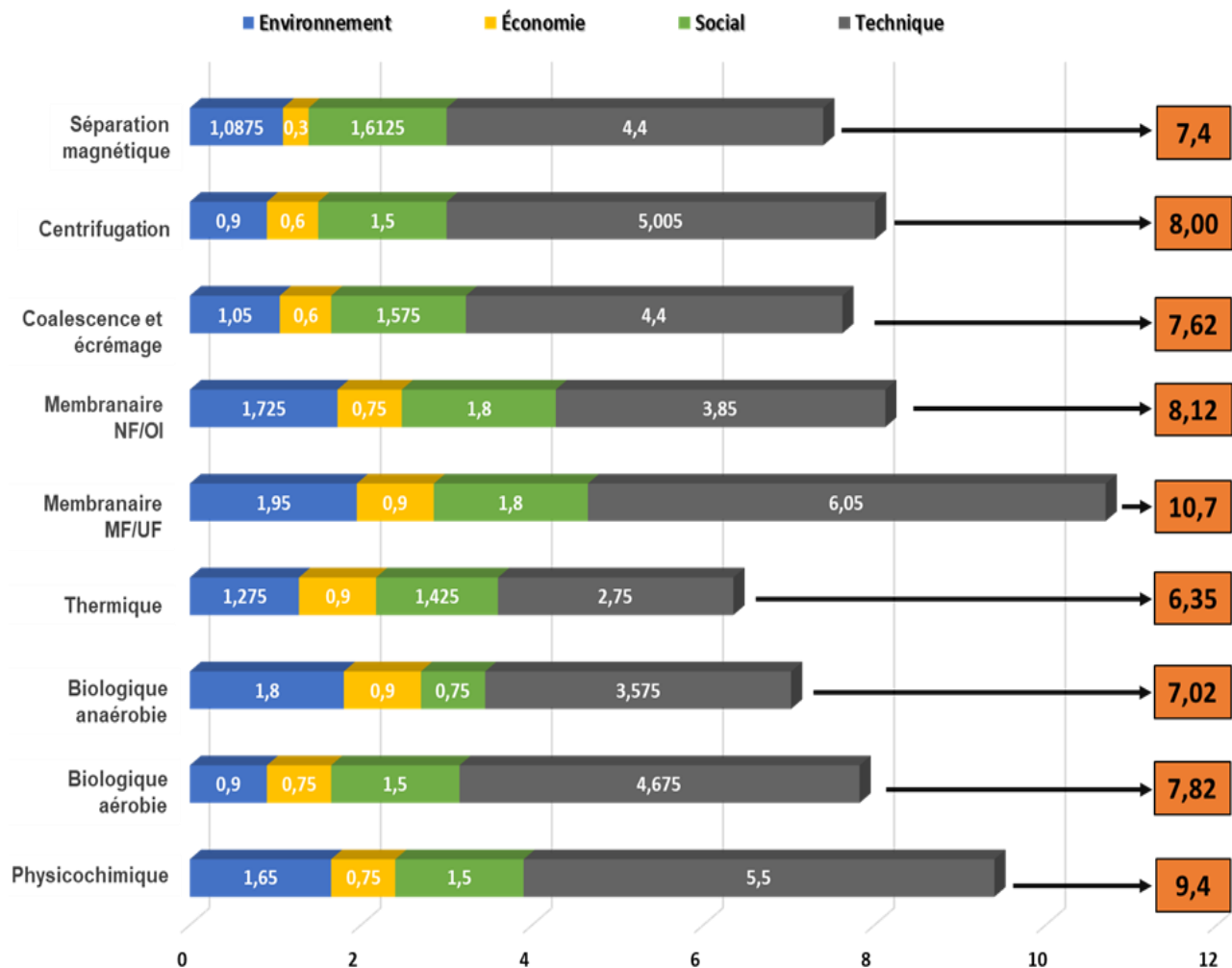


Figure 5.4 : Présentation graphique des résultats du processus de notation

Tableau 5.26 : Synthèse des résultats de processus de notation des options de traitement

Critères	Sous-critères	Résultat du processus de notation								
		Physico. chim.	Biologique		Therm.	Membranaire		Coalesc. et écrém.	Centrif.	Magn.
			Aéro.	Anaéro.		MF/UF	NF/OI			
Env.	Rejet et émissions indésirables	1,65	0,9	1,8	1,275	1,95	1,72	1,05	0,9	1,087
	Consommation d'énergie									
	Facilité de gestion et des déchets produits									
Éco.	Investissement initial	0,75	0,75	0,9	0,9	0,9	0,75	0,6	0,6	0,3
	Coûts de fonctionnement									
Social	Santé et sécurité	1,5	1,5	0,75	1,425	1,8	1,8	1,575	1,5	1,612
	Acceptabilité									
	Nuisances (odeur, bruit)									
Sous-total Développement durable		3,9	3,15	3,45	3,6	4,65	4,27	3,225	3	3
Efficac. tech.	Préservation des propriétés de la solution traitée	5,5	4,67	3,575	2,75	6,05	3,85	4,4	5,005	4,4
	Facilité et rapidité de mise en œuvre									
	Autonomie de la méthode de traitement									
Total		9,4	7,82	7,025	6,35	10,7	8,12	7,625	8,005	7,4

Avec ces résultats, un classement par ordre décroissant est opéré en fonction des notes totales obtenues par chaque option. Ce classement permet de déduire l'option la meilleure par rapport à l'objectif initial. Le procédé ayant totalisé le pointage le plus élevé et donc qui occupe la première place du classement est retenue comme le procédé de traitement le plus adapté. Le tableau 5.27 ci-dessous rend compte de ce classement

Tableau 5.27 : Classement des options en fonction des notes cumulées

Option de traitement	Note	Classement	Note de référence	% de réalisation
Membranaires par microfiltration et ultrafiltration	10,7	1	14,25	75 %
Physicochimique	9,4	2		66 %
Membranaires par nanofiltration et osmose inverse	8,125	3		53 %
Centrifugation	8,005	4		53 %
Biologiques par voie aérobie	7,825	5		55 %
Coalescence et écrémage	7,625	6		54 %
Magnétique	7,4	7		52 %
Biologiques par voie anaérobie	7,025	8		49 %
Thermique	6,35	9		45 %

L'analyse démontre que la technique membranaire par microfiltration ou ultrafiltration est la mieux adaptée pour le traitement et la réutilisation avec une note totale de 10,7 qui correspond à 75 % de la note de référence de 14,25. Cette option répond en grande partie aux deux objectifs principaux de cette étude, à savoir d'une part, l'efficacité technique du procédé qui implique la préservation des propriétés refroidissantes et lubrifiantes de la solution traitée, sa simplicité de manœuvre et sa capacité de traitement sans association de procédés complémentaires et d'autre part, le respect des enjeux de développement durable incluant la préservation de l'environnement et la prise en considération des aspects économiques et sociaux. Sur le plan de l'efficacité technique, les membranes MF et UF préservent mieux les propriétés de lubrification et de refroidissement du perméat avec un bon rendement d'élimination des turbidités, des matières en suspension et des microorganismes. De plus Diaz (2001) confirme que l'ultrafiltration est la mieux adaptée en matière de recyclage des huiles usées, dont les fluides de coupe. En outre, ce système peut s'insérer facilement et rapidement dans l'environnement actuel sans besoins de modifications majeures ni d'espace supplémentaire. Sur le plan du développement durable, la technique MF/UF consomme peu d'énergie en plus de ne rejeter presque aucun polluant dans l'environnement. Cela induit une faible pression sur l'utilisation des ressources et donc la préservation de la qualité de l'environnement.

Cependant, ce procédé présente quelques limites quant à son autonomie. En effet, le perméat obtenu à l'issue du passage à travers les membranes MF et UF nécessite des ajustements, notamment d'anticorrosifs, d'antibactériens et d'antimousse pour ajuster sa performance. Ce constat est confirmé par

une étude réalisée par Laforest et Coll. en 2004 sur les techniques membranaires dans la valorisation des fluides de coupe où un fluide de type microémulsion et un autre de type solution ont été étudiés par procédé d'ultrafiltration. Cette étude conclut que pour la microémulsion usée, l'ultrafiltration élimine les huiles étrangères et la contamination bactérienne. Pour le fluide de type solution vraie ou fluide synthétique, le perméat obtenu peut être réutilisé comme lubrifiant après ajout mineur de certains additifs.

En définitive, le procédé de traitement par microfiltration et ultrafiltration apparaît comme une technique efficace de maintenance des fluides de coupe aqueux en cours d'utilisation. Il fait partie des technologies propres permettant d'augmenter la durée de vie des fluides de coupe en assurant leur réemploi dans le processus de production et donc de réduire leur quantité rejetée dans l'environnement.

CONCLUSION

La gestion des matières dangereuses résiduelles est complexe et passe par des avenues parfois complémentaires, notamment par les étapes du mode de gestion selon les 3RV-E. L'objectif de ce travail visait à évaluer la faisabilité du réemploi des fluides de coupe dans les machines CNC de l'usine U1 de Verbom Inc. localisée à Valcourt. Pour y parvenir, il fallait d'abord dégager l'arsenal légal et réglementaire qui encadre cette activité, ensuite exposer et analyser les options de traitement qui existent pour le réemploi de fluide de coupe et enfin sélectionner la meilleure des options, compatible avec l'environnement de l'entreprise.

Le contexte réglementaire englobe les lois et règlements provinciaux et fédéraux en lien avec l'environnement d'une part et la santé et la sécurité des travailleurs d'autre part. Au niveau provincial, les plus importants touchant les fluides de coupes sont la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), le Règlement sur les matières dangereuses (RMD), le Règlement sur le transport des matières dangereuses (RTMD), la Loi et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (LSST et RSST). Sur le plan fédéral, la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE) et le Règlement sur les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses (RMT) sont pertinents. L'ensemble de ces dispositions juridiques édictent des règles de sécurité minimale à respecter en matière de transport et de gestion des MDR pour mieux protéger l'environnement puis les obligations des travailleurs et des employeurs en lien avec l'usage des MDR.

Au niveau de la gestion des MDR au Québec, près de 350 000 tonnes de MDR sont générées chaque année avec une proportion de plus de 73 % pour l'industrie de la première transformation des métaux. Par ailleurs, la catégorie des huiles et graisses minérales ou synthétiques contribue à plus de 6 % de cette production totale de MDR. Le mode de gestion se fait suivant trois voies essentiellement, à savoir l'élimination, la valorisation à des fins énergétiques et le traitement qui est le mode le plus répandu avec une proportion de 76 % de l'ensemble des modes de gestion. Néanmoins, les directives de la politique québécoise de gestion des matières et du RMD orientent fortement vers la hiérarchie de la gestion des MDR suivant le principe des 3RV-E, c'est-à-dire la réduction à la source, le réemploi, le recyclage, la valorisation à des fins énergétiques et l'élimination. Concernant spécifiquement l'entreprise Verbom Inc., l'étude s'est limitée aux fluides de coupe résiduels émanant des machines CNC et formulés à partir de l'huile CIMPULSE 45 MP. Le liquide résiduel est recueilli et stocké dans des contenants préparés à cet effet puis confié à une structure sous-traitante habilitée à transporter et à prendre en charge à l'extérieur du site de l'entreprise.

Les fluides de coupe se classent en deux grandes familles : les huiles entières employées sans eau et les fluides aqueux utilisés par l'entreprise et donc traités dans cette étude. Ils sont dilués en proportions variables entre 1 et 10 % dans de l'eau pour préparer le mélange aqueux. Ils se distinguent en trois variantes, à savoir les macroémulsions qui contiennent plus de 50 % du produit dans le mélange, les microémulsions contiennent moins de 50 % de l'huile et les solutions vraies qui ne contiennent pas d'huile minérale, mais plutôt des substances détergentes avec des additifs. Les fluides de coupe peuvent être source de risques biologiques, environnementaux et sanitaires pour les utilisateurs en provoquant des irritations, des allergies, des maladies respiratoires, des affections cutanées et des cancers.

Selon le type d'huile en présence : huile entière ou fluide aqueux, les procédés de traitement peuvent varier. Ils se distinguent en sept voies : les traitements physicochimiques, les procédés membranaires, la voie thermique, les traitements biologiques, le système par coalescence et écrémage, la séparation magnétique et la technique par centrifugation. Le choix d'une option de traitement est fonction de la nature et des caractéristiques du produit en présence et de l'usage prévu à l'issue du traitement. Le traitement physicochimique permet de rompre l'émulsion huile/eau et d'isoler les deux phases par l'action de substances chimiques ajoutées comme les coagulants et les floculants. Il est précédé d'un traitement mécanique qui élimine les fractions grossières comme les copeaux de métal, les sables et les graisses. Le traitement biologique aussi appelé traitement secondaire permet d'attaquer les polluants organiques biodégradables, les substances azotées et phosphatées. Il nécessite l'usage de microorganismes aérobies agissant en milieu aéré ou anaérobies à l'abri de l'air. Deux avenues sont empruntées dans ce traitement : la voie aérobie convertit la matière organique en matériel cellulaire soit par lits bactériens ou par boues activées alors que l'anaérobie aboutit à la formation de biogaz par digestion de la matière organique sans oxygène. Le procédé thermique consiste en des opérations successives de chauffage et de refroidissement de la solution traitée en vue de neutraliser les microorganismes. Les voies continues et discontinues sont employées suivant l'objectif à atteindre dans des systèmes d'échanges de chaleur tubulaires, à plaque ou à surface raclée dépendamment de la viscosité et la nature du fluide traité. Les procédés membranaires sont des techniques de séparation qui impliquent l'intervention d'une membrane sélective sous l'effet d'une pression. En fonction du diamètre des pores, ils se distinguent en microfiltration (10 à 0,1 μm), ultrafiltration (0,1 à 0,01 μm), nanofiltration (0,01 à 0,001 μm) ou osmose inverse (0,001 à 0,0001 μm). Dépendamment des objectifs de traitement, diverses géométries de membranes sont employées : membranes tubulaires, en spirale ou à feuilles plates. Le processus de filtration achemine le fluide d'un milieu contaminé appelé rétentat vers un milieu traité nommé perméat, les deux séparés une membrane. La ségrégation du mélange traité peut se faire sur une base stérique pour les membranes à grands pores

comme les microfiltrations et par effet électrostatique pour les petites ouvertures de pores, notamment l'osmose inverse. La séparation magnétique des copeaux et particules dans le liquide de coupe se fait selon les dispositifs à disques ou à gille. Les matériaux aimantés sont attirés et extraits du liquide qui passe à travers le système. La coalescence et l'écémage des huiles font partir des techniques de déshuilage employées dans l'industrie. Par la coalescence, les gouttelettes d'huile sont agrégées pour favoriser leur libération et accumulation en surface du liquide afin de permettre leur récupération par écémage. Il existe les coalesceurs à plaques métalliques et ceux constitués d'anneaux plastiques. Elle est efficace avec les mélanges contenant l'eau grâce à la forte attraction qu'exercent les molécules d'eau (72,8 dyn/cm à 20 °C). Cette technique contribue à séparer les huiles parasites présentes dans un mélange aqueux et est adaptée au traitement de grands volumes. La centrifugation utilise la force centrifuge générée par le mouvement rotatoire du système pour séparer les mélanges liquide-liquide ou liquide-solide. Elle permet de retirer les particules collectées à la périphérie du contenant de la machine. Pour chacun de ces moyens de traitement, une analyse est faite des avantages et inconvénients en lien avec l'objectif de permettre le réemploi de la solution traitée dans les opérations d'usinage de pièces avec les machines CNC.

Ces procédés de traitement, regroupés en neuf scénarios sont comparés à travers l'outil d'analyse multicritère pour sélectionner l'option adaptée. Ainsi, onze critères sont identifiés et scindés en deux familles. D'abord, ceux qui permettent d'évaluer l'efficacité technique de la méthode sont distingués. Ils préservent les propriétés de la solution traitée, sont faciles et rapides à mettre en œuvre et ont une autonomie d'action. Ces critères sont pondérés à 55 % pour montrer l'importance de l'efficacité de la méthode dans le traitement de la solution. Ensuite, les critères de développement durable avec un poids de 45 % sont aussi considérés en vue d'intégrer les aspects économiques, sociaux et environnementaux aux processus de sélection et de la mise en œuvre du procédé choisi. De plus, un barème de notation avec une échelle de 1 à 5 est élaboré; où 1 indique que le procédé répond moins bien au critère et 5 lorsque celui-ci est bien adapté. Les résultats de l'analyse indiquent que la méthode membranaire par microfiltration et ultrafiltration est la mieux adaptée pour le traitement et le réemploi des fluides de coupe. Cette prise de position est motivée, d'abord, par ce que le procédé sélectionné assure le mieux l'intégrité technique de la solution traitée par la préservation de ses propriétés refroidissantes et lubrifiantes, sa facilité et sa simplicité de mise en œuvre puis sa capacité de traitement autonome. Ensuite, elle est soutenue par son respect des défis de développement durable, dont la préservation de l'environnement. Néanmoins, il est recommandé de bonifier la solution traitée par l'ajout d'additifs anticorrosifs, antibactériens et antimousse pour parfaire son efficacité.

À cet effet, ce travail préliminaire pourrait ouvrir la voie à des études plus poussées permettant de caractériser le perméat MF/UF et déterminer avec exactitude la nature et les proportions des ajustements à apporter. De plus, vu la complexité des fluides de coupe et leurs effets sur la santé des travailleurs et vu que ce travail s'est limité au contexte de l'entreprise à Valcourt, une étude à l'échelle de la province pourrait contribuer à mieux éclairer les connaissances actuelles sur la problématique des fluides de coupe et leur impact sanitaire au Québec.

RÉFÉRENCES

- Adeline M. (2019). *Échangeur thermique : fonctionnement, types et efficacité*. Total Énergies. <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/echangeur-thermique-fonctionnement-types-et-efficacite>
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'environnement] (2020). Erwann FANGEAT. In Extenso Innovation Croissance, Alice DEPROUW, Marion JOVER, Mathilde BORIE, Océane TONSART. *Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques*. 102 pages.
- AFNOR (1987). *NF ISO 6743-7, Lubrifiants, huiles industrielles et produits connexes (Classe L)*. Classification, Partie 7 : famille M (travail des métaux). AFNOR.
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [ANSES], (2012). *Les fluides de coupes : État des connaissances sur les usages, les expositions et les pratiques de gestion en France*. Rapport d'étude. Édition scientifique. France
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [ANSES], (2017). *Fluides de coupes : Préconisations pour la maîtrise des risques chimiques et biologiques*. France
- Agro-alimentaire (2009). *3 Mise en œuvre des traitements thermiques : principes, matériels et conduite*. https://tice.agrocampus-ouest.fr/pluginfile.php/2444/mod_resource/content/0/html/ch3.html
- Alguima M. A. (2014). *Gestion des matières dangereuses résiduelles et des matières résiduelles électroniques pour une entreprise de télécommunication canadienne* (Essai de maîtrise), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Ambroise B. (2004). *Séparation par membranes (Notes de cours)*. Université de technologie de Compiègne, France. http://ambroise.brou1.free.fr/fm_002.htm
- Ammi-Said A. (2019). *Valorisation des ressources hydriques et production de l'eau purifiée par les procédés membranaires* (Thèse de doctorat en chimie), Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie.
- ANRED [Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets] (1988). *Les déchets des industries du traitement de surface*, Étude et rapport. France.
- Arzate A. (2008). *Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire*. Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole (ACER). Revue de littérature. Saint-Norbert d'Arthabaska, Québec, Canada.
- Association française de normalisation [AFNOR] (2014). *Management de la valeur-Vocabulaire-Termes et définitions*.
- Association sectorielle — Fabrication d'équipements de transport et de machines [ASFETM] (2014). *Introduction au Règlement sur la santé et la sécurité du travail*. Présenté à Saguenay par Waguih Geadah, Ingénieur/Coordonnateur, ASFETM. <http://www.asfetm.com/wp-content/uploads/2013/11/IntroRSST141017.pdf>
- Assurance Maladie (2021). *Fluides de coupe. Comment prévenir les risques ?* Webinaire 12/03/2021. France

- Ba N. (2009). *Analyse multicritère pour la priorisation des interventions en matière d’approvisionnement en eau en milieu rural au Sénégal : cas de la région de Diourbel* (Mémoire de maîtrise). Université Laval, Laval, Québec, Canada.
- BAPE (2022). *Rapport 364. L’état des lieux et la gestion des résidus ultimes*. 696 p. Québec, Canada.
<https://voute.bape.gouv.qc.ca/dl?id=00000273113>
- BAPE (2022). *L’état des lieux et la gestion des résidus ultimes*. Rapport d’enquête et d’audience publique numéro 364 : Faits saillants. Québec, Canada.
- Bensaada S. (2019). *Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes*. Université de Biskra, Biskra, Algérie.
- Berland J-M et Juery C. (2002). *Les procédés membranaires pour le traitement de l’eau*. Document technique N 14. Fonds national pour le développement des adductions d’eau (FNDAE).
https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/37/185566/185566_doc.pdf
- Bouchard-Martel V. (2016). *Analyse de l’applicabilité de la réglementation pour un changement rapide des comportements citoyens québécois en gestion des matières résiduelles* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Bouchra B. (2013). *Stratégies et mécanismes d’appui municipal pour une gestion responsable des matières résiduelles par les ICI* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Bouwer, E.J; McCarty, P.L. (1983). *Transformations of 1- and 2-carbon halogenated aliphatic organic compounds under methanogenic conditions*. Appl.Environ.Microbio Vol.45 Num. 45 1286-1294. 1983
- Cabinet NPM (2020). *Procédés de traitement des eaux usées*. Article paru le 07 novembre 2020.
<https://cabinetnpm.com/procedes-de-traitement-des-eaux-usees/>
- Caisse d’assurance retraite et de la santé au travail [CARSAT] (s.d.). *Huiles et fluides de coupe dans l’usage des métaux*. <https://www.carsat-ra.fr/home/entreprise/prevenir-les-risques-professionnels/par-type-de-risque/risques-chimiques/huiles-et-fluides-de-coupe-dans-lusage-des-metaux.html>
- Carême S. (1999). *Techniques de rinçages + traitement des effluents = Rejet liquide nul*, Galvano-organo Traitement de surface, Article publié en avril 1999, n° 693, p 307-308, Allemagne.
- Centre canadien d’hygiène et de sécurité au travail [CCHST] (2019). *Fluides pour le travail des métaux*. Gouvernement du Canada, Canada.
https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/metalworking_fluids.html
- Centre d’activités régionales pour la production propre [CARPP] (2005). *Prévention de la pollution dans le sous-secteur de l’usage des métaux*. Barcelone, Espagne.
- Centre National d’innovation pour le Développement durable et l’Environnement dans les Petites entreprises (CNIDEP) (2020). *Traitement des eaux de rinçage par déshuilage-coalescence*.
http://www.cnidep.com/deshuilage_coalescence154.html et
<http://www.cnidep.com/centrifugation121.html>
- Centre technique des industries mécaniques (2006). *Guide de réduction des COV dégraissage lessiviel en substitution des solvants*. Action collective « Solvants en Aquitaine », France.

- Communauté métropolitaine de Montréal [CMM] (2007). *Évaluation et comparaison de scénarios de GMR selon une approche de cycle de vie*. Document interne, 342 p.
- Condorchem (2022). *Traitement biologique des eaux usées*.
<https://condorchem.com/fr/blog/traitement-biologique-des-eaux-usees/>
- CRAMIF [Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France] (2011). *Prévention des cancers professionnels : Exposition aux fluides de coupe (huiles entières et fluides aqueux)*. Fiche d'information et de prévention FIP 4. France.
- Dallaire C. (2012). *Actualisation de la gestion intégrée des zones de récupération des matières dangereuses résiduelles à Hydro-Québec* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Dallaire N. et Olivier M. (2019). *Matières dangereuses résiduelles au Québec* (Version 2019). Éditions Lab, Québec, Canada.
- Dassault Systèmes (2022). *Usinage CNC – Soustractif. L'usinage CNC, c'est quoi et comment ça marche ?* | Dassault Systèmes® (3ds.com)
- De Laat J. (2018). *Pourquoi et comment traiter les eaux usées urbaines*, Encyclopédie de l'environnement, Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers ?, Poitiers, France. [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=5771>
- Déon S. et Fiévet P. (2017). *Chapitre XIII. Traitement des eaux par nanofiltration : généralités, mécanismes et applications* Besançon p. 373-415. Besançon, France. (Généré le 23 juillet 2022). <http://books.openedition.org/pufc/11162> .ISBN : 9 782 848 677 583.
- Département des risques professionnels (2019). *Usinage des matériaux : Guide de choix du fluide de coupe, du captage des brouillards d'huile et des micropoussières*, Bordeaux, France.
- Diaz J.P. (2001). *Application des membranes au traitement des eaux usées*. Synthèse technique. École nationale du génie, des eaux et des forêts (ENGREF), Montpellier, France.
- Dilger, S., Fluri, A., & Sonntag, H.G. (2005). *Bacterial Contamination of Preserved and Non-Preserved Metal Working Fluids*, International Journal of Environmental Health, 208: 67-476.
- Direct Industry (2022). *Séparateur électromagnétique à disque DMD series*.
<https://www.directindustry.fr/prod/losma/product-14589-1083183.html>
- Direction de la salubrité et de l'inspection des aliments (s.d.). *Séparateurs magnétiques dans la transformation des aliments*. Manitoba. <https://www.gov.mb.ca/agriculture/food-safety/at-the-food-processor/food-safety-program/pubs/separateurs-magnetiques.pdf>
- Duchaine C., Veillette M., Cornier Y., Lavoie J., Desjardins F., Hakim B. (2003). *Analyse microbienne des fluides de coupe de métaux*. Rapport R-341 IRSST. Université Laval. Québec, Canada.
- Écohabitation (2021). *Désinfection et déphosphatation des eaux usées domestiques*. Article écrit par Alban Pilard et Lydia Paradis Bolduc, mise à jour du 28 juillet 2021.
<https://www.ecohabitation.com/guides/2442/desinfection-et-dephosphatation-des-eaux-usees-domestiques/>
- Enviro-Urgence (2020). *Une autorisation pour transporter les matières dangereuses au Québec ?*
<https://www.enviourgence.com/fr/blogue/autorisation-transport-matieres-dangereuses-residuelles-quebec/>
- ETEMI (2021). *Écrémur oléophile*. <https://etemi.fr/produit/ecremeur-oleophile/>

- Fayolle R. et Coll. (2001). *Ateliers de traitement thermique : Hygiène et sécurité*. Cahier des notes documentaire – Hygiène et sécurité du travail Num. 183, 2^e trimestre 2001. INRS, Paris, France.
- Fellahi E.A. (1998). *Biodégradation et gestion des huiles de coupes usées* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada.
- Fendinger, N.J., Versteeg, D.J., Weeg, E., Dyer, S., Rapaport, R.A., Baker, L. (1991). *Environmental Behavior and Fate of Anionic Surfactants*. American Chemical Society, Washington, DC.
- Fitremann J.M. (1984). *La coalescence dans l'industrie*. Société Hydroscience, La houille blanche, numéro 5, Nantes, France. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1984021>
- Frenette C. (2009). *Analyse multicritère des compositions de mur à ossature légère en bois* (Thèse de doctorat). Université de Laval, Laval, Québec, Canada
- Fuchs (mars 2020). *Utilisation et maintenance des solubles d'usage*.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj4vq6M0t34AhUMklkEHS HDCbsQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.fuchs.com%2Ffileadmin%2Ffr%2FHome%2FIndustrie%2FPDF%2FUtilisation_et_maintenance_des_solubles_d_usage_V8_06_2020.pdf&usg=AOvVaw369Co5k2wnz0niseeHpAvb
- Gamache S. (2002). *Gestion des résidus dangereux et des matières résiduelles : Bilan et perspectives pour Neokimia Inc* (Essai de maîtrise), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Genesis Water Tech (2019). *Avantages et inconvénients des méthodes de traitement des eaux usées : coagulation et désinfection*. <https://fr.genesiswatertech.com/blog-post/pros-and-cons-of-wastewater-treatment-methods-coagulation-disinfection/>
- Girard M. (1997). *Traitement des effluents de l'industrie du désencrage par procédés membranaires* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, Canada.
- Giroud JC (2021). *Les fluides de coupe : des produits potentiellement polluants et dangereux pour l'environnement*. Fluids and Lubricants, Article scientifique, Fiches pratiques lubrifiants industriels. <https://fluidsandlubricants.com/2021/05/21/les-fluides-de-coupe-des-produits-potentiellement-polluants-et-dangereux-pour-lenvironnement/>
- Giroud JC (2022). *Fluides de coupe : Faire rimer productivité et environnement*. Fluids and Lubricants, Article scientifique paru le 21 mars 2022, Fiches pratiques lubrifiants industriels. <https://fluidsandlubricants.com/2022/03/21/fluides-de-coupe-faire-rimer-productivite-et-environnement-2/>
- Gorny, R.L., Szponar, B., Larsson, L., Pehrson, C., Prazmo, Z. & Dutkiewick, J. (2004). *Metalworking Fluid Bioaerosols at Selected Workplaces in a Steelwork*. American Journal of Industrial Medicine, 46: 400-403.
- Gouvernement du Canada (2021). *Le Règlement sur les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/reglement-mouvements-transfrontaliers-dechets-dangereux-matieres-recyclables-dangereuses.html>
- GrandJean B. (s.d.). *Chapitre 10 : Traitements anaérobies*. Matériels pédagogiques, Traitement des eaux usées industrielles. Université Laval, Laval, Québec, Canada. <http://www.grandjean-bpa.com/eauxusees/chap10/chap-10.pdf>
- Granger L. (2020). *Outils d'aide à la décision : connaître et utiliser*. <https://www.manager-go.com/gestion-de-projet/aide-a-la-decision.htm>

- Groupe français de génie de procédés [GFGP] (1993). *Traitement et valorisation des effluents liquides industriels*. Volume 7, Numéro 25. Nancy, France
- Guide des déchets des entreprises de Guadeloupe (2022). *Fluides de coupe*. <https://www.guidedechets-gp.fr/dechets/dechets-dangereux/article/fluides-de-coupe>
- Hamdache A. (2012). *Modélisation de l'ultrafiltration des huiles de coupe dans une cellule agitée en batch* (Mémoire de magister), Université des sciences et de la technologie houari Boumédiène, Alger, Algérie.
- Holand, W. et Stennis J. (2000). *Assessment and system analysis of industrial waste management*, Waste management, vol. 20, no 7, p. 537-543
- Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal (1984). *Éléments du programme de surveillance médico-environnementale pour les travailleurs exposés aux brouillards et fluides de coupe ou de refroidissement*. Département de santé communautaire. Québec, Canada
- Hydro-Québec TransÉnergie (2013). *Synthèse des connaissances environnementales pour les lignes et postes, 1973-2013*. https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/15_GestionDesContaminants.pdf
- ID System Fluid (2019). *7 méthodes efficaces pour purifier vos fluides (avec ou sans purificateur)*. Article paru le 11 janvier 2019. <https://idsystemfluid.com/7-methodes-pour-purifier-vos-fluides/>.
- INP Toulouse (s.d.). *Procédé de traitement de la station : Choix du procédé et du mode de fonctionnement*. INP-ENSIACET. Toulouse, France. https://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0506/bei/bei_ere/1/html/binom2/choixpro.htm
- Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail [IRSST] (2005). *Documentation des risques dans les centres de transfert des matières dangereuses résiduelles*. R-402. Québec, Canada.
- Jacquart J.C et Coll. (1993). *Traitement biologique des eaux résiduaires industrielles : Évolutions récentes et expériences industrielles*. Groupe français de génies des procédés. Degremont, France.
- Jantaporn W. (2016). *Technologies membranaires innovantes pour la réutilisation des eaux* (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse, France.
- Katia D. et coll. (2020). *Les fluides de coupe*. Travail & sécurité n 816 mai-juin 2020. INRS, France
- Laforest V. et Coll. (2004). *Valorisation des fluides de coupe usés, partie 1 : Cas des techniques membranaires*. Revue francophone d'écologie industrielle, Numéro 36, 4^e trimestre 2004. École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, Saint-Étienne, France.
- Lavoué J., Begin D., Gérin M. (2002). *La substitution des solvants par les nettoyeurs aqueux : le dégraissage des métaux*. Rapport B-064, IRSST, Université de Montréal, Québec, Canada.
- Ledoux, M. et Roy C. (1997). *Guide pratique de gestion des matières dangereuses*, Sherbrooke, Conseil régional de l'environnement de l'Estrie, 126 p.
- Lenntech (2022). *Technologie membranaire : Systèmes membranaires*. <https://www.lenntech.fr/francais/membrane-technologie>
- Loi sur la qualité de l'environnement [LQE] (2018), R.L.R.Q., c. Q -2. Titre I, Chapitre I, Art. 1.
- Loi sur le développement durable, (LDD), (2006). *C.d -8.1.1*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/developpement/principes.pdf>

- Losma (s.d.). *Demag : Epurateurs Magnétiques à Disques Rotatifs (Fiche technique)*.
https://www.losma.it/wp-content/uploads/2017/06/DMD_FRA-1.pdf
- Lussier C. (2003). *Les matières dangereuses résiduelles en Estrie* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Mail, I. Joshi, J. K., Sethi, H.S. (2002). *Sustainable development – effluent management : Waste treatment and deposal plant*, cew – Chemical Engineering world, Vol. 37, no 4, p.64-70.
- Marchand G. et Coll. (2010). *Réduction de la contamination bactérienne des fluides de coupe*. IRSST, Études et recherches, Rapport R-655. Québec, Canada.
- Matevi (2022). *Filtre tangentiel*. <https://www.matevi-france.com/oenologie/filtration/120-filtre-tangentiel.html>
- Mavideniz (2022). *Écumeur multi-huile _ Brosse + Disque + Tambour + Rainuré*.
https://mavideniz.com.tr/fr/produits-industriels/ecumeur-dhuile/ecumeur-multi-huile-_brosse-disque-tambour-rainure/
- McLaughlin, M.C.; Zisman, A.S. (1998). *The Aqueous Cleaning Handbook*. The Morris-Lee Publishing Group, Rosemont, New Jersey
- MDDEP (2002). *Les matières résiduelles*, Gouvernement du Québec, MDDEP
- MELCC (2009). *Guide pour la prise en compte des principes de développement durable*.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/developpement/outils/guide-principesdd.pdf>
- Mercier-Bouchard D. (2017). *Optimisation des performances de membranes polymériques spiralées pour la séparation des caséines du lait par microfiltration (Mémoire de maîtrise)*. Université de Laval, Laval, Québec, Canada.
- Micet (2022). *Guide des échangeurs de chaleur à plaques*. Guide des échangeurs de chaleur à plaques - Micet Craft
- Milande N. et Coll. (1993). *Utilisation de champignons filamenteux pour la récupération de métaux dans les effluents industriels*. Département de biologie moléculaire et structurale, Grenoble, France.
- Ministère de l’Agriculture, de l’Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales. *Etude des pré-traitements compacts basés uniquement sur le tamisage fin*. Document technique, FNDAE n° 28, Lyon, France.
- Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC] (2021a). *Portrait des matières dangereuses résiduelles au Québec : années 2012 à 2018*. Québec, Canada.
- Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC] (2021 b). *Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification*. Québec, Canada, 49 p.
- Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC] (2022a). *Le Règlement sur les matières dangereuses en bref*.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/dangereux/index.htm>
- Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC] (2022 b). *Gestion des matières dangereuses résiduelles. Production du rapport ou du bilan annuel*.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/dangereux/rapport/annexe4-rmd.htm>

- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC] (s.d. a).
Administration régionale Kativik. *Guide sur la gestion des matières dangereuses résiduelles au Nunavik, Guide n° 1*
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC] (s.d. b).
Administration régionale Kativik. *Guide sur la gestion des matières dangereuses résiduelles au Nunavik, Guide n° 2*
- Morais D. C. et Almeida A.T., (2006) : *Water supply system decision making using multicriteria analysis*.
Water SA 32-2, 229-236
- Ndiaye M.S. (2022). *Étude de différentes approches visant au recyclage des eaux de lavage d'un procédé de traitement de contenants de PEHD post-consommation* (Mémoire de maîtrise). École de technologie supérieure, Montréal, Québec, Canada.
- Nirinaharisoa H.V. (2008). *Récupération des huiles de base et valorisation des sous-produits à partir de régénération*. (Mémoire de diplôme d'études approfondies en chimie). Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar
- Olivier, M. (2015). *Matières résiduelles et 3RV-E — Bâtir l'économie circulaire*, 2^e éd., Lab Éditions, Longueuil, 308 pages.
- ONU Femmes (2012). *Analyse FFOM*. <https://www.endvawnow.org/fr/articles/1180-analyse-ffom-.html?next=1176>
- Plymovent (2022). *À propos du brouillard d'huile*. <https://www.plymovent.com/fr/elimination-des-brouillards-d-huile/a-propos/a-propos-du-brouillard-d-huile>
- Presta (2019). *Les risques chimiques causés par les fluides de coupe*. <https://www.presta-asso.fr/?s=Les+risques+chimiques+caus%C3%A9s+par+les+fluides+de+coupe>
- Presta (2021). *Les risques chimiques causés par les fluides de coupe*. <https://www.presta-asso.fr/wp-content/uploads/Les-risques-chimiques-causes-par-les-Fluides-de-coupe-2021-03-19-1.pdf>
- ProGestion Estrie (2019). *Verbom, un succès « made in Valcourt »*. Article.
<https://progestion.qc.ca/verbom-un-succes-made-in-valcourt/>
- Qasim M., Badrelzaman M., Darwish N.N., Darwish N.A., Hilal N. (2019). *Reverse osmosis desalination: a state-of-the-art review*. *Desalination*, vol. 459: p.59-104.
- RCY (2014). *Récupération d'hydrocarbures : Ecrémur à disques/brosses*. <https://rcy.fr/ecremur-disques-brosses/>
- Recommandation (2015). *Prévention des risques chimiques causés par les fluides de coupe dans les activités d'usinage de métaux*. R451. 2^e édition, INRS, France.
- Recyc-Québec (2017). *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*, Bibliothèque et archives Canada, 2017, Québec, Canada.
- Recyc-Québec (2012). Glossaire. In RECYC-QUÉBEC. *Centre de documentation*.
<http://www.recycquebec.gouv.qc.ca/client/fr/rubriques/glossaire.asp#R>
- Renaud C. (2003). *Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie*. Série scientifique, Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations (CIRANO), Montréal, Québec, Canada.

- Romdhane A. (2014). *Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nanocristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation* (Thèse de doctorat). Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Roy B. (2005). *Paradigms and Challenges* dans Multiple criteria decision analysis: State of the Art Surveys Figueira, Greco et Ehrgott éditeurs, Springer's international Series 3-24.
- Safe drinking water foundation (SDWF) [s.d.]. *Ultrafiltration, nanofiltration et l'osmose inverse*. <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/2/5/uf-nf-osmose-inverse>
- Scienceaq (2022). *Avantages et inconvénients des traitements biologiques des eaux usées*. <http://fr.scienceaq.com/Nature/100109159.html>
- Sigg, L., Behra, Ph., Stumm, W. (2014). *Chimie des milieux aquatiques*. 5ème édition, Dunod, Paris, France
- Silex International (2022). *Système d'écémage à Bande*. <http://www.silexinternational.com/?produits=systeme-decremage-a-bande>
- Siva (2022). *Ultrafiltration*. <https://www.siva-unit.com/procedes/procedes-de-filtration-membranaires/filtration-tangentielle/ultrafiltration/>
- Société suisse pour la protection de l'environnement [SSPE] (1997). *Les déchets dangereux*, Chêne-Bourg (Suisse), Georg Éditeur, 125 p.
- Sofise (2019). *Filtration frontale, filtration tangentielle : laquelle choisir ?* Article paru le 28 novembre 2019. <https://blog.sofise-filtration.com/industries-pharma-biotech/filtration-frontale-filtration-tangentielle-laquelle-choisir>
- Sollau (2020). *Séparateur magnétique à grille à nettoyage manuel MRZ*. <https://www.sollau.fr/separateur-magnetique-a-grille-a-nettoyage-manuel-mrz>
- Spécialités industrielles Sherbrooke [SIS] (2020). *Échangeurs de chaleur*. Échangeurs de chaleur - SIS Spécialités Industrielles Sherbrooke (sissherbrooke.com)
- Suez (2022a). *Modules à fibres creuses*. Article. <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/separation-par-membranes/les-modules-disponibles-leur-geometrie/modules-a-fibres-creuses>
- Suez (2022 b). *Destruction des fluides aqueux*. <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/processus-industriels-et-traitements-des-effluents-residuaires/industries-automobile-et-mecanique/destruction-des-fluides-aqueux>
- Techni-contact (2022). *Séparateur magnétique à disques*. <https://www.techni-contact.com/produits/869-16578819-separateur-magnetique-a-disques.html>
- Techniques de l'ingénieur (2005). *Fluides de coupe – Huiles solubles*. Article de référence BM7065v3. Benoit Broquerie. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mise-en-forme-des-materiaux-par-usinage-42510210/fluides-de-coupe-bm7065/produits-et-formulation-bm7065niv10001.html>
- Thibodeau M. et coll. (2011). *Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : État de la situation et perspectives de développement*. Rapport présenté dans le cadre du programme de laboratoire rural des Îles-de-la-Madeleine. Québec, Canada.
- Thorne, P. S. (1996). *Environmental Assessment of Aerosols, Bioaerosols, and Airborne Endotoxins in a Machining Plant*. Aihaj, 57, 1163-1167.

- Tremblay S. (2015). *Analyse comparative et recommandations de gestion des déchets dangereux dans les organisations de recherche* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Tsoukias A. (2008). *From decision theory to decision aiding methodology*, European Journal of Operational Research, 187-1, 138-161.
- Union des travailleuses et travailleurs accidentés ou malades [UTTAM] (2016). *Les fluides de coupe, un problème de santé au travail méconnu*, Dr Pierre Auger, Montréal, Québec, Canada.
<https://uttam.quebec/chronique-MT/fluides-de-coupe.php>
- Unisontekco (2018). *Fonctionnement des machines CNC*. <https://unisontekco.com/fr/fonctionnement-des-machines-cnc/>
- Université de Sherbrooke (2012). *Manuel de santé et sécurité*. Département de chimie, Faculté des sciences, 90 p.
- Urli B. (2013). *Méthode omniscritère - méthode d'aide à la concertation, à la décision, et à la gestion de projet*. Préparé pour le compte du ministère des transports du Québec. Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada.
- Veillette, M., Thorne, P.S., Gordon, T. & Duchaine, C. (2004). *Six Month Follow-up of Microbial Contamination in Metalworking Fluid System after Dumping, Cleaning and Recharging*. in American Thoracic Society, 98th General Meeting, Atlanta, GA, USA.
- Verbom (2022). *Présentation de l'entreprise*. <https://www.verbom.com/a-propos/>
- Webster, A.R., Lee J. & Deininger, R.A. (2005). *Rapid Assessment of Microbial Hazards in Metalworking Fluids*. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2: 213-218.
- Weplex (2022). *Échangeur thermique à plaques soudées*. <https://weplex-heatexchanger.com/weplex-presentation/>
- Wild P. (2018). *Exposition aux fluides de coupe et marqueurs d'effets précoces : stress oxydant, inflammation et génotoxicité*. Les cahiers de la Recherche N° 11. Santé, Environnement, Travail. ANSES, 2018, La santé au travail, pp.16-17. Vandœuvre-lès-Nancy, France
- Yataghene M. (2007). *Étude expérimentale et numérique de la structure de l'écoulement et de la dissipation visqueuse dans un échangeur de chaleur à surface raclée* (Thèse de doctorat). Université de Nantes, Nantes, France.
- 1H₂O₃ (2022). *Le traitement physico-chimique pour le prétraitement de l'eau*. <https://www.1h2o3.com/apprendre/traitement-physico-chimique/>

ANNEXE 1 : FICHES TECHNIQUES DU CIMCOOL CIMPULSE 45MP



FICHE SIGNALÉTIQUE

1. Identification

Identificateur de produit CIMPULSE™ 45MP
Fluide métallurgique

Autres moyens d'identification

Numéro de la FDS Sans objet

Code du produit B01894

Usage recommandé Fluide métallurgique

Restrictions d'utilisation Aucun(e) connu(e).

Renseignements sur le fabricant/importateur/fournisseur/distributeur
Fabricant

Nom de la société CIMCOOL® Industrial Products LLC
Rue de 3000 Disney
Cincinnati, Ohio 45209

Telephone (General Information) 513-458-8100

Numéro de téléphone d'appel d'urgence 1-800-424-9300 (CHEMTREC)

Emergency telephone number (outside USA) 1-703-527-3887 (CHEMTREC)

Fournisseur

Nom de la société Milacron Canada Corp.

Adresse 1175 Appleby Line Road, Unit B-1
Burlington Ontario L7L5H9 Canada

Telephone (General Information) 905-319-1919

Emergency telephone number (outside USA) 1-703-527-3887 (CHEMTREC)

Fournisseur Non disponible.

2. Identification des dangers

Dangers physiques Non classé.

Dangers pour la santé Irritation de la peau Catégorie 2
Irritation oculaires graves Catégorie 2A
Sensibilisation cutanée Catégorie 1

Dangers environnementaux Non classé.

Éléments d'étiquetage



Mention d'avertissement Avertissement

Mention de danger Provoque une irritation cutanée. Provoque une sévère irritation des yeux. Peut provoquer une allergie cutanée.

Conseil de prudence	
Prévention	Éviter de respirer les brouillards ou les vapeurs. Se laver soigneusement après manipulation. Les vêtements de travail contaminés ne devraient pas sortir du lieu de travail. Porter une protection oculaire/faciale. Porter des gants de protection.
Intervention	EN CAS DE CONTACT AVEC LA PEAU : Laver avec beaucoup d'eau. En cas d'irritation ou d'éruption cutanée : Obtenir une consultation médicale ou des soins médicaux. EN CAS DE CONTACT AVEC LES YEUX: Rincer avec précaution à l'eau pendant plusieurs minutes. Enlever les lentilles de contact si la victime en porte et si elles peuvent être facilement enlevées. Continuer à rincer. Si l'irritation des yeux persiste : Demander un avis médical/Consulter un médecin. Enlever les vêtements contaminés et les laver avant réutilisation.
Stockage	Conserver à l'écart de matières incompatibles.
Élimination	Éliminer le contenu/récipient conformément à la réglementation locale/régionale/nationale/internationale.
Autres dangers	Aucun(e) connu(e).
Renseignements supplémentaires	1.24 % du mélange consiste en ingrédients de toxicité aiguë inconnue par ingestion. 5.64 % du mélange consiste en ingrédients de toxicité aiguë inconnue par contact cutané. Les possibles risques indiqués sur cette fiche SDS sont associés au concentré du produit. Ces risques ne sont pas envisagés sous les conditions et dilution recommandées.

3. Composition/information sur les ingrédients

Mélanges

Dénomination chimique	Nom commun et synonymes	Numéro d'enregistrement CAS	%
SEVERELY-HYDROTREATED NAPHTHENIC DISTILLATES		64742-52-5	≤25
HEXAHYDRO-1,3,5-TRIS (2-HYDROXYETHYL)-S- TRIAZINE		4719-04-4	≤5
Isopropanolamine		78-96-6	≤5
ARYL, ALKYL DERIVS., SULFONATED SODIUM SALTS		148520-82-5	≤3
PETROLEUM SULFONIC ACID, SODIUM SALT		68608-26-4	≤1.5
Autres composants sous les niveaux à déclarer			≤95

Toutes les concentrations sont en pourcentage en poids, sauf si l'ingrédient est un gaz. Les concentrations des gaz sont en pourcentage en volume.

4. Premiers soins

Inhalation	Transporter à l'extérieur. Appeler un médecin si des symptômes se développent ou persistent. Dans des conditions normales d'utilisation prévue, ce produit ne devrait pas présenter un danger par inhalation.
Contact avec la peau	Rincer la peau avec de l'eau. En cas d'irritation ou d'éruption cutanée : Obtenir une consultation médicale ou des soins médicaux. Laver les vêtements contaminés avant réutilisation.
Contact avec les yeux	Rincer avec de l'eau. Enlever les lentilles de contact si la victime en porte et si elles peuvent être facilement enlevées. Continuer à rincer. Consulter un médecin si une irritation se développe et persiste.
Ingestion	Rincer soigneusement la bouche. Boire un ou deux verres d'eau. Ne pas faire vomir. En cas de vomissement, garder la tête basse pour éviter une pénétration du contenu de l'estomac dans les poumons. Demander un avis médical/Consulter un médecin en cas de malaise.
Symptômes et effets les plus importants, qu'ils soient aigus ou retardés	Le contact direct avec les yeux peut causer une irritation temporaire. Les symptômes peuvent inclure un picotement, un larmoiement, une rougeur, un gonflement et une vision trouble. Irritation de la peau. Peut provoquer une allergie cutanée.
Mention de la nécessité d'une prise en charge médicale immédiate ou d'un traitement spécial, si nécessaire	Donner des soins généraux et traiter en fonction des symptômes. Les symptômes peuvent être retardés.
Informations générales	Si exposé(e) ou préoccupé(e) : Obtenir une consultation médicale ou des soins médicaux. Présenter cette fiche de données de sécurité au médecin traitant.

5. Mesures à prendre en cas d'incendie

Agents extincteurs appropriés	Mousse. Poudre chimique. Dioxyde de carbone (CO2). Utiliser des moyens d'extinction appropriés aux conditions locales et au milieu environnant.
--------------------------------------	---

Agents extincteurs inappropriés	Ne pas utiliser un jet d'eau comme agent extincteur, car cela propagera l'incendie.
Dangers spécifiques du produit dangereux	Des gaz dangereux pour la santé peuvent se former pendant un incendie.
Équipements de protection spéciaux et précautions spéciales pour les pompiers	Porter l'équipement de protection approprié.
Équipement/directives de lutte contre les incendies	Utiliser des procédures standard en cas d'incendie et tenir compte des dangers des autres substances en cause. Éloigner les récipients du lieu de l'incendie si cela peut se faire sans risque.
Méthodes particulières d'intervention	Utiliser des procédures standard en cas d'incendie et tenir compte des dangers des autres substances en cause. En cas d'incendie et/ou d'explosion, ne pas respirer les fumées.
Risques d'incendie généraux	Aucun risque inhabituel d'incendie ou d'explosion observé.

6. Mesures à prendre en cas de déversement accidentel

Précautions individuelles, équipements de protection et mesures d'urgence	Tenir à l'écart le personnel non requis. Tenir les gens à l'écart de l'endroit du déversement/de la fuite et en amont du vent. Porter un équipement et des vêtements de protection appropriés durant le nettoyage. Éviter de respirer les brouillards ou les vapeurs. Ne pas toucher les récipients endommagés ou le produit déversé à moins de porter des vêtements de protection appropriés. S'assurer une ventilation adéquate. Prévenir les autorités locales si des fuites significatives ne peuvent pas être contenues. Pour la protection individuelle, voir la section 8 de la FDS.
Méthodes et matériaux pour le confinement et le nettoyage	Prévenir les autorités locales si des fuites significatives ne peuvent pas être contenues. Ce produit est miscible dans l'eau. Nettoyer selon les réglementations applicables. Déversements importants : Arrêter l'écoulement de la substance, si cela peut se faire sans risque. Endiguer le matériau déversé, lorsque cela est possible. Absorber avec de la vermiculite, du sable sec ou de la terre, puis placer en récipient. Après avoir récupéré le produit, rincer la zone à l'eau. Déversements peu importants : Essuyer avec une matière absorbante (par ex., tissu, lainage). Nettoyer la surface à fond pour éliminer la contamination résiduelle. Ne jamais réintroduire le produit répandu dans son récipient d'origine en vue d'une réutilisation. Pour l'élimination des déchets, voir la section 13 de la FDS.
Précautions relatives à l'environnement	Contactez les autorités locales en cas de déversements dans les égouts ou le milieu aquatique. Éviter le rejet dans les égouts, les cours d'eau ou sur le sol. Utiliser un endiguement approprié pour éviter toute contamination de l'environnement.

7. Manutention et stockage

Précautions relatives à la sûreté en matière de manutention	Ne pas couper, souder, braser, percer, broyer ou exposer les récipients à de la chaleur, à une flamme, à des étincelles ou à d'autres sources d'ignition. Éviter de respirer les brouillards ou les vapeurs. Éviter tout contact avec les yeux, la peau et les vêtements. Assurer une ventilation efficace. Porter un équipement de protection individuelle approprié. Observer de bonnes pratiques d'hygiène industrielle.
Conditions de sûreté en matière de stockage, y compris les incompatibilités	Stocker dans des récipients d'origine fermés de manière étanche. Stocker à l'écart des matériaux incompatibles (Consulter la section 10 de la FDS). Ne pas laisser le matériel geler. Si le produit est gelé, il se séparera. Le laisser entièrement fondre à la température ambiante et bien l'agiter avant de l'utiliser.

8. Contrôle de l'exposition/protection individuelle

Limites d'exposition professionnelle

ACGIH	Type	Valeur
(CAS 64742-52-5)	TWA	5 mg/m ³
Valeurs biologiques limites	Aucune limite d'exposition biologique observée pour les ingrédients.	
Contrôles d'ingénierie appropriés	Il faut utiliser une bonne ventilation générale (habituellement dix changements d'air l'heure). Les débits de ventilation doivent être adaptés aux conditions. S'il y a lieu, utiliser des enceintes d'isolement, une ventilation locale ou d'autres mesures d'ingénierie pour maintenir les concentrations atmosphériques sous les limites d'exposition recommandées. Si des limites d'exposition n'ont pas été établies, maintenir les concentrations atmosphériques à un niveau acceptable. Des douches oculaires et d'urgence sont recommandées.	
Mesures de protection individuelle, telles que les équipements de protection individuelle		
Protection du visage/des yeux	Porter des lunettes de sécurité à écrans latéraux (ou des lunettes à coques). Éviter tout contact avec les yeux. Une douche oculaire est recommandée.	

Protection de la peau	
Protection des mains	Utiliser des gants de protection en : Nitrile.
Autre	Porter des gants appropriés résistants aux produits chimiques
Protection respiratoire	En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
Dangers thermiques	Porter des vêtements de protection thermique appropriés, au besoin.
Considérations d'hygiène générale	Ne pas manger, ne pas boire et ne pas fumer pendant l'utilisation. Éviter tout contact avec les yeux, la peau ou les vêtements. Toujours adopter de bonnes pratiques d'hygiène personnelle, comme se laver après avoir manipulé la substance et avant de manger, de boire ou de fumer. Laver régulièrement les vêtements de travail et l'équipement de protection pour éliminer les contaminants

9. Propriétés physiques et chimiques

Apparence	CLEAR
État physique	Liquide.
Forme	Liquide.
Couleur	Non disponible.
Odeur	CHEMICAL
Seuil olfactif	Non disponible.
pH	9.5
Point de fusion et point de congélation	-3.3 °C (26 °F)
Point initial d'ébullition et domaine d'ébullition	> 100 °C (> 212 °F)
Point d'éclair	Sans objet
Taux d'évaporation	Comme de l'eau une fois dilué
Inflammabilité (solides et gaz)	Sans objet.
Limites supérieures et inférieures d'inflammabilité ou d'explosibilité	
Limites d'inflammabilité - inférieure (%)	Non disponible.
Limites d'inflammabilité - supérieure (%)	Non disponible.
Limite d'explosibilité - inférieure (%)	Non disponible.
Limite d'explosibilité - supérieure (%)	Non disponible.
Tension de vapeur	Non disponible.
Densité de vapeur	Non disponible.
Densité relative	Non disponible.
Solubilité	
Solubilité (eau)	100 % Water Miscible
Coefficient de partage n-octanol/eau	Non disponible.
Température d'auto-inflammation	Non disponible.
Température de décomposition	Non disponible.
Viscosité	Non disponible.
Autres informations	
Propriétés explosives	Non explosif.
Propriétés comburantes	Non oxydant.
pH dans une solution aqueuse	8.8 @ 5%
Densité	1.020

10. Stabilité et réactivité

Réactivité	Le produit est stable et non réactif dans des conditions normales d'utilisation, d'entreposage et de transport.
Stabilité chimique	La substance est stable dans des conditions normales.
Risque de réactions dangereuses	Aucune réaction dangereuse connue dans des conditions normales d'utilisation.
Conditions à éviter	Chaleur, flammes et étincelles. Contact avec des matériaux incompatibles.
Matériaux incompatibles	Acides. Agents comburants. Ne pas ajouter de nitrite de sodium ou autres agents de nitrosation qui pourraient former des nitrosamines cancérigènes.
Produits de décomposition dangereux	La fumée, les émanations, les oxydes d'azote, et les oxydes de carbone.

11. Données toxicologiques

Renseignements sur les voies d'exposition probables

Inhalation	Non classé.
Contact avec la peau	Provoque une irritation cutanée. Peut provoquer une allergie cutanée.
Contact avec les yeux	Provoque une irritation des yeux.
Ingestion	Non classé.

Les symptômes correspondant aux caractéristiques physiques, chimiques et toxicologiques Le contact direct avec les yeux peut causer une irritation temporaire. Les symptômes peuvent inclure un picotement, un larmolement, une rougeur, un gonflement et une vision trouble. Irritation de la peau. Peut provoquer une allergie cutanée.

Renseignements sur les effets toxicologiques

Toxicité aiguë Inconnu(e).

Composants	Espèces	Résultats d'épreuves
------------	---------	----------------------

ARYL, ALKYL DERIVS., SULFONATED SODIUM SALTS (CAS 148520-82-5)

Aiguë

Orale

DL50

Rat

404 mg/kg

Isopropanolamine (CAS 78-96-6)

Aiguë

Cutané

Liquide

DL50

Lapin

1576 mg/kg

Orale

Liquide

DL50

Rat

2813 mg/kg

* Les estimations pour le produit peuvent être basées sur d'autres données de composants non montrées.

Corrosion cutanée/irritation cutanée Provoque une irritation cutanée.

Lésions oculaires graves/irritation oculaire Provoque une irritation des yeux.

Sensibilisation respiratoire ou cutanée

Sensibilisation respiratoire Pas un sensibilisant respiratoire.

Sensibilisation cutanée Peut provoquer une allergie cutanée.

Mutagénicité sur les cellules germinales Il n'existe pas de données qui indiquent que ce produit, ou tout composant présent à des taux de plus de 0,1 %, soit mutagène ou génotoxique.

Cancérogénicité Ce produit n'est pas considéré comme cancérigène par le CIRC, l'ACGIH, le NTP ou l'OSHA.

Toxicité pour la reproduction On ne s'attend pas à ce que ce produit présente des effets sur la reproduction ou le développement.

Toxicité pour certains organes cibles - exposition unique Non classé.

Toxicité pour certains organes cibles - expositions répétées	Non classé.
Danger par aspiration	Pas un danger par aspiration.
Effets chroniques	Non classé.
Autres informations	La classification des dangers environnementaux et pour la santé est dérivée d'une combinaison de méthodes de calculs et de données d'essai, si disponible.

12. Données écologiques

Écotoxicité Contient une substance qui fait courir un risque d'effets néfastes pour l'environnement.

Composants	Espèces		Résultats d'épreuves
Isopropanolamine (CAS 78-96-6)			
Aquatique			
Poisson	CL50	Cyprin doré (carassius auratus)	210 mg/l, 96 heures
Aiguë			
Crustacés	CE50	Daphnia	109 mg/l, 48 heures

* Les estimations pour le produit peuvent être basées sur d'autres données de composants non montrées.

Persistance et dégradation

Potentiel de bioaccumulation

Log K_{ow} du coefficient de répartition octanol/eau
Isopropanolamine -0.93

Mobilité dans le sol Ce produit est miscible dans l'eau.

Autres effets nocifs On ne s'attend pas à ce que ce composant ait des effets néfastes sur l'environnement (par ex., appauvrissement de la couche d'ozone, potentiel de formation photochimique d'ozone, perturbation endocrinienne, potentiel de réchauffement de la planète).

13. Données sur l'élimination

Instructions pour l'élimination Recueillir et réutiliser ou éliminer dans des récipients scellés dans un site d'élimination des déchets autorisé. Éliminer le contenu/récipient conformément à la réglementation locale/régionale/nationale/internationale.

Règlements locaux d'élimination Détruire conformément à toutes les réglementations applicables.

Code des déchets dangereux Les codes de déchets doivent être attribués dans le cadre d'une consultation entre l'utilisateur, le fabricant et l'entreprise de décharge.

Déchets des résidus / produits non utilisés Éliminer conformément à la réglementation locale. Les récipients ou pochettes vides peuvent conserver certains résidus de produit. Éliminer ce produit et son récipient d'une manière sûre (voir : instructions d'élimination).

Emballages contaminés Comme les récipients vides peuvent contenir un résidu du produit, suivre les avertissements de l'étiquette, même une fois le récipient vide. Les contenants vides doivent être acheminés vers une installation certifiée de traitement des déchets en vue de leur élimination ou recyclage.

14. Informations relatives au transport

TMD

N'entre pas dans la réglementation des marchandises dangereuses.

IATA

N'entre pas dans la réglementation des marchandises dangereuses.

IMDG

N'entre pas dans la réglementation des marchandises dangereuses.

Transport en vrac selon l'Annexe II de MARPOL 73/78 et le recueil IBC Non déterminé(e).

15. Informations sur la réglementation

Réglementation canadienne Ce produit a été classé conformément aux critères de danger énoncés dans le Règlement sur les produits dangereux et la FDS contient tous les renseignements exigés par le Règlement sur les produits dangereux.

Loi réglementant certaines drogues et autres substances
Non réglementé.

Liste des marchandises d'exportation contrôlée (LCPE 1999, Annexe 3)

Non inscrit.

Gaz à effet de serre

Non inscrit.

Règlements sur les précurseurs

Non réglementé.

Règlements internationaux

Convention de Stockholm

Sans objet.

Convention de Rotterdam

Sans objet.

Protocole de Kyoto

Sans objet.

Protocole de Montréal

Sans objet.

Convention de Bâle

Sans objet.

Inventaires Internationaux

Pays ou région	Nom de l'inventaire	Sur l'inventaire ou exempt (oui/non)*
Australie	Inventaire australien des substances chimiques (AICS)	Non
Canada	Liste intérieure des substances (LIS)	Non
Canada	Liste extérieure des substances (LES)	Oui
Chine	Inventaire des substances chimiques existantes en Chine (IECSC)	Oui
Europe	Inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes (EINECS)	Non
Europe	Liste européenne des substances chimiques notifiées (ELINCS)	Non
Japon	Inventaire des substances chimiques existantes et nouvelles (ENCS)	Non
Corée	Liste des produits chimiques existants (ECL)	Non
Nouvelle-Zélande	Inventaire de la Nouvelle-Zélande	Non
Philippines	Inventaire philippin des produits et substances chimiques (PICCS)	Non
États-Unis et Porto Rico	Inventaire du TSCA (Toxic Substances Controls Act - Loi réglementant les substances toxiques)	Oui

*La réponse « Oui » indique que tous les composants du produit sont conformes aux exigences d'entreposage du pays ayant compétence

16. Autres informations

Date de publication	05-20-2017
Version n°	01
Classements NFPA	Santé: 1 Inflammabilité: 0 Instabilité: 0

Avis de non-responsabilité À notre connaissance, les renseignements et recommandations de cette fiche de données de sécurité étaient précis à la date de publication. Les renseignements donnés sont conçus uniquement comme un guide pour la manipulation, l'utilisation, le traitement, l'entreposage, le transport, l'élimination et le rejet sécuritaires du produit et ne doivent pas être considérés comme une garantie ou une norme de qualité. Les renseignements sont liés uniquement au produit particulier indiqué et peuvent ne pas être valides pour un tel produit utilisé en association avec toute autre substance ou dans tout autre procédé, sauf si indiqué dans le texte.

**Informations relatives à la
révision**

Identification du produit et de l'entreprise : Types de substance
Identification des dangers : Classification des dangers UE
Composition / renseignements sur les ingrédients : Sommaire des composants
Propriétés physiques et chimiques : Propriétés multiples
Renseignements sur le transport : Nom de l'agence, type d'emballage et sélection du mode de transport
Informations réglementaires : Phrases dangers - Étiquetage
Attributs et utilisations de la substance; données expérimentales : Données expérimentales
Données réglementaires relatives au danger : Asie Pacifique
GHS: Classification

ANNEXE 2 : CATÉGORIES D'EMPLOI DES MATIÈRES DANGEREUSES (Dallaire, 2019)

CODE	CATÉGORIE
Huiles et graisses minérales ou synthétiques	
A01	Huiles usées dont la concentration en BPC < 3 mg/kg
A02	Huiles usées dont la concentration en BPC est > 3 mg/kg et < 50 mg/kg
A03	Eaux huileuses / émulsions
A04	Graisses usées
A05	Filtres à huile usés
Solides et boues organiques	
B01	Résidus de distillation, de raffinage ou de pyrolyse de composés organiques halogénés
B02	Résidus de distillation, de raffinage ou de pyrolyse de composés organiques non halogénés
B03	Boues de sédimentation ou de décantation d'hydrocarbures
B04	Résidus de produits pétroliers et d'hydrocarbures
B05	Solides ou boues organiques générés par le traitement des eaux de procédé ou des eaux usées
B06	Boue de décantation de l'industrie de la préservation du bois et produits hors d'usage
B07	Boues et résidus de préparation pharmaceutique et produits hors d'usage
B08	Boues et résidus solides de la production de pesticides et produits hors d'usage
B09	Boues et résidus de la formulation et de l'utilisation d'encre, de peinture, de colorants, de laques et vernis
B10	Boues des opérations de cokéfaction
B11	Boues et résidus de la formulation et de l'utilisation de résidus, latex plastifiants, colles, adhésifs et polymères
B12	Boues et résidus des opérations de décarburation et décalaminage
B13	Autres boues et solides organiques non spécifiés autrement (précisez)
B14	Filtres à peinture
Solvants organiques	
C01	Solvants organiques halogénés (halogènes organiques totaux > 0,15%)
C02	Solvants organiques non halogénés (halogènes organiques totaux < 0,15%)
C03	CFC utilisé comme solvant et nettoyeur
Solutions organiques	
D01	Antigels, fluides de frein et hydraulique
D02	Autres solutions organiques (précisez)
D03	Carburant (précisez)
Solides et boues inorganiques	
E01	Boues des opérations de traitement et revêtement de surface non spécifié autrement
E02	Catalyseurs usés
E03	Boues et résidus contenant des métaux
E04	Poussières métalliques
E05	Sels métalliques de trempage ou non
E06	Sels non métalliques de trempage ou non
E07	Anodes et cathodes usés
E08	Cendres
E09	Laitiers, écumes, écailles, gâteaux provenant de la production primaire des métaux
E10	Scories
E11	Sables de fonderie
E12	Filtres et matières filtrantes
E13	Solides, poussières ou boues générés par les systèmes d'épuration d'air
E14	Solides ou boues inorganiques générés par les systèmes d'épuration des eaux de procédé ou des eaux usées

E15	Batteries au plomb
E16	Batteries et autres accumulateurs
E17	Boues et résidus de la production, la formulation et l'utilisation de pigments inorganiques
E18	Boues de fluorure de calcium
E19	Sable de décapage usé
E20	Gypse issu de procédés industriels
E21	Verres activés (tubes cathodiques et autres)
E22	Autres boues et solides inorganiques non spécifiés autrement (précisez)
E23	Résidus mercuriels

Solutions aqueuses inorganiques

F01	Solutions usées de traitement et de revêtement de surface non spécifiées autrement
F02	Solutions et saumures contenant des cyanures, des sulfures, des nitrures
F03	Autres solutions inorganiques et saumures aqueuses (précisez)

Matières dangereuses acides (pH < 2)

G01	Liquides ou boues acides organiques
G02	Liquides ou boues acides inorganiques
G03	Autres matières acides (précisez)

Matières dangereuses caustiques (pH > 12,5)

H01	Liquides ou boues alcalines inorganiques
H02	Liquides ou boues alcalines organiques
H03	Autres matières alcalines (précisez)

Matières et objets contenant des BPC ou contaminés par des BPC

J01	Liquides contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1%)
J02	Liquides contenant des BPC à une concentration supérieure ou égale à 10 000 mg/kg (1%)
J03	Solides contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1%)
J04	Solides contenant des BPC à une concentration supérieure ou égale à 10 000 mg/kg (1%)
J05	Substances contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1%)
J06	Substances contenant des BPC à une concentration supérieure ou égale à 10 000 mg/kg (1%)
J07	Équipement contenant des BPC
J08	Équipement contaminé par des BPC
J09	Pièce métallique à nu contaminée par des BPC

Matières dangereuses provenant d'un laboratoire

K01	Laboratoire de recherche ou de développement industriel ou commercial
K02	Laboratoire d'un établissement d'enseignement
K03	Autres sources (précisez)

Matières dangereuses contaminées

L01	Équipements contaminés
L02	Contenants contaminés
L03	Autres matières contaminées (précisez)

Autres matières dangereuses

M01	Préparations pharmaceutiques, médicaments et cosmétiques hors d'usage
M02	Boues et résidus de tanneries
M03	Matières explosives non spécifiées autrement
M04	Matières radioactives non spécifiées autrement
M05	Boues de récurage et de décontamination de réservoirs et contenants non spécifiées autrement
M06	Résines échangeuses d'ions hors d'usage
M07	Autres matières non spécifiées autrement (précisez)

Mélanges (catégories réservées aux titulaires de permis visés à l'article 70.9 de la Loi sur la qualité de l'environnement)

N01	Mélange acide
N02	Mélange acide à réduire

N03	Mélange neutre
N04	Mélange alcalin
N05	Mélange alcalin/neutre à réduire
N06	Mélange à oxyder
N07	Mélange oxydant
N08	Combustible à faible valeur calorifique
N09	Combustible à faible valeur calorifique, halogéné
N10	Combustible à haute valeur calorifique
N11	Combustible à haute valeur calorifique, halogéné
N12	Mélange de solvants organiques
N13	Mélange de solutions organiques
N14	Mélange de boues et solides organiques
N15	Mélange de boues et solides inorganiques
N16	Mélange de solides organiques et inorganiques

Autres matières composant un mélange (catégories réservées aux titulaires de permis visés à l'article 70.9 de la Loi sur la qualité de l'environnement)

O01	Sols contaminés
O02	Matières non dangereuses

ANNEXE 3 : PRODUCTION DES MDR DE 2012 À 2018 PAR CATÉGORIE AU QUÉBEC (MELCC, 2021)

Catégorie de MDR		Quantité (kg)
Huiles et graisses minérales ou synthétiques		20 416 084
A01	Huiles usées dont la concentration en BPC est < ou = 3 mg/kg	6 666 710
A02	Huiles usées dont la concentration en BPC est > 3 mg/kg et < ou = 50 mg/kg	257 233
A03	Eaux huileuses/émulsions	12 879 525
A04	Graisses usées	288 312
A05	Filtres à l'huile usés	324 304
Solides et boues organiques		11 590 368
B01	Résidus de distillation, de raffinage ou de pyrolyse de composés organiques halogénés	1 093
B02	Résidus de distillation, de raffinage ou de pyrolyse de composés organiques non halogénés	26 605
B03	Boues de sédimentation ou de décantation d'hydrocarbures	3 047 992
B04	Résidus de produits pétroliers et d'hydrocarbures	1 077 150
B05	Solides ou boues organiques générés par le traitement des eaux de procédé ou des eaux usées	2 313 745
B06	Boue de décantation de l'industrie de la préservation du bois et produits hors d'usage	119 407
B07	Boues et résidus de préparation pharmaceutique et produits hors d'usage	187 135
B08	Boues et résidus solides de la production de pesticides et produits hors d'usage	2 249
B09	Boues et résidus de la formulation et de l'utilisation d'encre, de peinture, de colorants, de laques et vernis	1 033 953
B10	Boues des opérations de cokéfaction	0
B11	Boues et résidus de la formulation et de l'utilisation de résidus, latex plastifiants, colles, adhésifs et polymères	651 268
B12	Boues et résidus des opérations de décarburation et décalaminage	38 219
B13	Autres boues et solides organiques non spécifiés autrement	3 033 202
B14	Filtres à peinture	58 350
Solvants organiques		2 020 512
C01	Solvants organiques halogénés (halogènes organiques totaux > 0,15 %)	52 727
C02	Solvants organiques non halogénés (halogènes organiques totaux < ou = 0,15 %)	1 957 672
C03	CFC utilisé comme solvant et nettoyeur	10 114
Solutions organiques		3 642 776
D01	Antigels, fluides de frein et hydraulique	369 906
D02	Autres solutions organiques	3 190 449
D03	Carburants	82 421
Solides et boues inorganiques		228 221 173
E01	Boues des opérations de traitement et revêtement de surface non spécifié autrement	135 359
E02	Catalyseurs usés	985 515
E03	Boues et résidus contenant des métaux	31 727 657
E04	Poussières métalliques	384 406
E05	Sels métalliques de trempage ou non	1 556 455
E06	Sels non métalliques de trempage ou non	2 384 948
E07	Anodes et cathodes usées	58 770 117
E08	Cendres	320 066
E09	Laitiers, écumes, écailles, gâteaux provenant de la production primaire des métaux	33 926 264
E10	Scories	20 187 526
E11	Sables de fonderie	2 637 005
E12	Filtres et matières filtrantes	787 218
E13	Solides, poussières ou boues générés par les systèmes d'épuration d'air	42 884 095

E14	Solides ou boues inorganiques générés par les systèmes d'épuration des eaux de procédé ou des eaux usées	1 707 578
E15	Batteries au plomb	1 940 888
E16	Batteries et autres accumulateurs	101 878
E17	Boues et résidus de la production, la formulation et l'utilisation de pigments inorganiques	21 201
E18	Boues de fluorure de calcium	0
E19	Sable de décapage usé	702 404
E20	Gypse issu de procédés industriels	430
E21	Verres activés (tubes cathodiques et autres)	53 868
E22	Autres boues et solides inorganiques non spécifiés autrement	26 984 256
E23	Résidus mercuriels	22 036
Solutions aqueuses inorganiques		4 433 642
F01	Solutions usées de traitement et de revêtement de surface non spécifiées autrement	1 901 434
F02	Solutions et saumures contenant des cyanures, des sulfures, des nitrures	378 741
F03	Autres solutions inorganiques et saumures aqueuses	2 153 467
Matières dangereuses acides (pH < 2)		38 324 115
G01	Liquides ou boues acides organiques	178 071
G02	Liquides ou boues acides inorganiques	37 256 339
G03	Autres matières acides	889 705
Matières dangereuses caustiques (pH > 12,5)		8 167 633
H01	Liquides ou boues alcalines inorganiques	7 637 679
H02	Liquides ou boues alcalines organiques	420 377
H03	Autres matières alcalines	109 577
Matières et objets contenant des BPC ou contaminés par des BPC		429 566
J01	Liquides contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1 %)	10 610
J02	Liquides contenant des BPC à une concentration > ou = 10 000 mg/kg (1 %)	7 922
J03	Solides contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1 %)	77 671
J04	Solides contenant des BPC à une concentration > ou = 10 000 mg/kg (1 %)	64
J05	Substances contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1 %)	0
J06	Substances contenant des BPC à une concentration > ou = 10 000 mg/kg (1 %)	156
J07	Équipement contenant des BPC	17 519
J08	Équipement contaminé par des BPC	43 035
J09	Pièce métallique à nu contaminée par des BPC	272 589
Matières dangereuses provenant d'un laboratoire		100 868
K01	Laboratoire de recherche ou de développement industriel ou commercial	55 771
K02	Laboratoire d'un établissement d'enseignement	11
K03	Autres sources	45 086
Matières dangereuses contaminées		23 773 235
L01	Équipements contaminés	2 808 287
L02	Contenants contaminés	772 763
L03	Autres matières contaminées	20 192 185
Autres matières dangereuses		8 914 010
M01	Préparations pharmaceutiques, médicaments et cosmétiques hors d'usage	2 112 614
M02	Boues et résidus de tanneries	6 588
M03	Matières explosives non spécifiées autrement	1 047 584
M04	Matières radioactives non spécifiées autrement	1 557

M05	<i>Boues de récurage et de décontamination de réservoirs et contenants non spécifiées autrement</i>	76 448
M06	<i>Résines échangeuses d'ions hors d'usage</i>	6 715
M07	<i>Autres matières non spécifiées autrement</i>	5 662 504
Total		350 033 982

ANNEXE 4 : QUANTITÉS MOYENNES DE MDR TRAITÉES DE 2012 À 2018 AU QUÉBEC (MELCC, 2021)

Catégories de MDR		Quantité (kg)
Huiles et graisses minérales ou synthétiques		99 139 036
A01	Huiles usées dont la concentration en BPC est ≤ 3 mg/kg	42 143 523
A02	Huiles usées dont la concentration en BPC est > 3 mg/kg et ≤ 50 mg/kg	1 392 434
A03	Eaux huileuses/émulsions	51 872 013
A04	Graisses usées	33 034
A05	Filtres à l'huile usés	3 698 032
Solides et boues organiques		8 126 279
B01	Résidus de distillation, de raffinage ou de pyrolyse de composés organiques halogénés	237
B02	Résidus de distillation, de raffinage ou de pyrolyse de composés organiques non halogénés	11 473
B03	Boues de sédimentation ou de décantation d'hydrocarbures	1 537 032
B04	Résidus de produits pétroliers et d'hydrocarbures	1 284 760
B05	Solides ou boues organiques générés par le traitement des eaux de procédé ou des eaux usées	20 943
B06	Boue de décantation de l'industrie de la préservation du bois et produits hors d'usage	45 904
B07	Boues et résidus de préparation pharmaceutique et produits hors d'usage	5 337
B08	Boues et résidus solides de la production de pesticides et produits hors d'usage	0
B09	Boues et résidus de la formulation et de l'utilisation d'encre, de peinture, de colorants, de laques et vernis	1 307 734
B11	Boues et résidus de la formulation et de l'utilisation de résidus, latex plastifiants, colles, adhésifs et polymères	129 717
B12	Boues et résidus des opérations de décarburation et décalaminage	3 389 697
B13	Autres boues et solides organiques non spécifiés autrement	383 961
B14	Filtres à peinture	9 483
Solvants organiques		3 476 007
C01	Solvants organiques halogénés (halogènes organiques totaux $> 0,15$ %)	206 695
C02	Solvants organiques non halogénés (halogènes organiques totaux $\leq 0,15$ %)	3 268 844
C03	CFC utilisé comme solvant et nettoyeur	468
Solutions organiques		3 834 516
D01	Antigels, fluides de frein et hydraulique	3 331 521
D02	Autres solutions organiques	479 149
D03	Carburants	23 845
Solides et boues inorganiques		398 271 014
E01	Boues des opérations de traitement et revêtement de surface non spécifié autrement	8 249
E02	Catalyseurs usés	12 309
E03	Boues et résidus contenant des métaux	86 875 206
E04	Poussières métalliques	4 067 014
E05	Sels métalliques de trempage ou non	487 890
E06	Sels non métalliques de trempage ou non	305
E07	Anodes et cathodes usées	114 006 286
E08	Cendres	482 298
E09	Laitiers, écumes, écailles, gâteaux provenant de la production primaire des métaux	34 808 217
E10	Scories	2 309 113
E11	Sables de fonderie	871 109
E12	Filtres et matières filtrantes	12 931
E13	Solides, poussières ou boues générés par les systèmes d'épuration d'air	3 345 472
E14	Solides ou boues inorganiques générés par les systèmes d'épuration des eaux de procédé ou des eaux usées	402 850

E15	Batteries au plomb	103 482 269
E16	Batteries et autres accumulateurs	626
E17	Boues et résidus de la production, la formulation et l'utilisation de pigments inorganiques	883
E19	Sable de décapage usé	883
E20	Gypse issu de procédés industriels	2 874
E21	Verres activés (tubes cathodiques et autres)	5 783
E22	Autres boues et solides inorganiques non spécifiés autrement	47 088 118
E23	Résidus mercuriels	330
Solutions aqueuses inorganiques		39 975 496
F01	Solutions usées de traitement et de revêtement de surface non spécifiées autrement	39 084 842
F02	Solutions et saumures contenant des cyanures, des sulfures, des nitrures	148
F03	Autres solutions inorganiques et saumures aqueuses	890 507
Matières dangereuses acides (pH < 2)		9 192 221
G01	Liquides ou boues acides organiques	3 118
G02	Liquides ou boues acides inorganiques	9 164 525
G03	Autres matières acides	24 578
Matières dangereuses caustiques (pH > 12,5)		6 332 085
H01	Liquides ou boues alcalines inorganiques	3 967 538
H02	Liquides ou boues alcalines organiques	645
H03	Autres matières alcalines	2 363 902
Matières et objets contenant des BPC ou contaminés par des BPC		1 530 619
J01	Liquides contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1 %)	11 576
J03	Solides contenant des BPC à une concentration comprise entre 50 mg/kg et 10 000 mg/kg (1 %)	251 853
J07	Équipement contenant des BPC	787 022
J08	Équipement contaminé par des BPC	42 558
J09	Pièce métallique à nu contaminée par des BPC	437 610
Matières dangereuses provenant d'un laboratoire		52 734
K01	Laboratoire de recherche ou de développement industriel ou commercial	6 105
K02	Laboratoire d'un établissement d'enseignement	617
K03	Autres sources	46 012
Matières dangereuses contaminées		60 772 678
L01	Équipements contaminés	2 801 184
L02	Contenants contaminés	699 267
L03	Autres matières contaminées	57 272 227
Autres matières dangereuses		7 965 626
M01	Préparations pharmaceutiques, médicaments et cosmétiques hors d'usage	283 433
M03	Matières explosives non spécifiées autrement	397 861
M05	Boues de récurage et de décontamination de réservoirs et contenants non spécifiées autrement	1 267
M06	Résines échangeuses d'ions hors d'usage	152
M07	Autres matières non spécifiées autrement	7 282 913
Mélanges		4 780 633
N01	Mélange acide	3 636
N03	Mélange neutre	4 641 422
N04	Mélange alcalin	25 442
N07	Mélange oxydant	37 730
N12	Mélange de solvants organiques	6 910
N13	Mélange de solutions organiques	233

<i>N14</i>	<i>Mélange de boues et solides organiques</i>	<i>65 260</i>
Autres catégories19		817 369
Total		644 266 312

ANNEXE 5 : SYNTHÈSE DES CRITÈRES D'ANALYSE ET DES BARÈMES D'APPRÉCIATION

Critères	Sous-critères	Barème (en point)		
		1-2	3-4	5
Environnement	Rejet et émissions indésirables dans l'environnement	La technique produit des déchets et émissions atmosphériques importantes	La technique rejette moyennement des déchets et des émissions dans l'air	La technique produit peu ou pas de déchets et émissions atmosphériques sont négligeables
	Consommation d'énergie	Procédé énergivore pendant son fonctionnement	Besoin modéré en énergie	Le procédé nécessite un apport faible en énergie et peut produire de l'électricité pour compenser sa consommation
	Facilité de gestion et d'élimination des déchets produits	Les déchets générés sont volumineux et variés puis nécessitent des moyens spécifiques pour être éliminés	Les déchets sont moyennement volumineux, d'un à deux types et peuvent s'éliminer sans grande difficulté	Les déchets sont d'un seul type et peu volumineux puis peuvent se gérer aisément.
Économie	Investissement initial	Le procédé nécessite l'acquisition d'équipements spécifiques et difficiles à se procurer; avec absence de modèles commercialisés ou bien Les investissements initiaux sont supérieurs à 50 000\$	Les équipements sont accessibles, mais il n'y a pas de modèles commercialisés. Le système doit être installé en entier ou en partie sur le site ou bien L'investissement varie entre 21 000\$ et 49 000\$	Le procédé requiert peu d'équipement et l'approvisionnement est facile. Des systèmes commercialisés existent ou bien Le montant d'investissement est inférieur à 20 000\$
	Coûts de fonctionnement	La technique utilise plusieurs consommables, produits chimiques avec des entretiens répétitifs ou bien Les charges de fonctionnement dépassent les 30 000\$ l'année	La technique nécessite l'usage de quelques produits avec des fréquences d'entretien modérées ou bien Les charges de fonctionnement varient entre 16 000\$ et 29 000\$	La technique requiert peu ou pas d'intrants avec peu d'entretien pendant son fonctionnement ou bien Les charges annuelles sont inférieures à 15 000\$

Social	Santé et sécurité du travail	La technique présente des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs et ne permet pas d'appliquer le principe de précaution et de prévention efficacement	La technique présente des risques connus, mais des actions de remédiation peuvent être appliquées avec certaines incertitudes	La technique est bien connue et les travailleurs agissent en toute sécurité. Le principe de précaution et de prévention peut être appliqué dès l'implantation du procédé
	Acceptabilité	Au moins 2 des parties intéressées (travailleurs, sous-traitants, municipalité de Valcourt, inspecteurs du ministère) n'adhèrent pas à la technique de traitement	Une des parties intéressées n'adhère pas à la technique	Tous les acteurs adhèrent à la mise en œuvre de la technique
	Nuisances (odeurs, bruits)	Le procédé induit des nuisances considérables et handicapantes pour les travailleurs et les habitants voisins du site	Les nuisances du procédé sont modérées	Le procédé produit peu ou pas de nuisance
Efficacité technique	Préservation des propriétés physicochimiques de la solution traitée	Les propriétés du fluide traité sont détériorées. Nécessité d'ajouts importants de constituants pour améliorer la qualité	Les propriétés sont faiblement affectées et nécessitent l'ajout de peu d'éléments d'appoint	Les propriétés sont conservées. Le fluide traité est prêt à l'usage
	Facilité et rapidité de mise en œuvre	Le procédé nécessite des modifications majeures dans l'architecture actuelle de l'usine U1 et ne peut être fonctionnel avant au moins 6 mois	Le procédé induit des travaux modérés et peut être fonctionnel en 3 mois	Le procédé s'insère facilement dans l'environnement actuel avec très peu d'aménagement spatial et peut être fonctionnel en 1 mois
	Autonomie de la méthode de traitement	Le procédé seul ne permet pas d'atteindre les objectifs de traitement. Il nécessite l'association d'au moins 2 techniques de traitement complémentaires	Le procédé nécessite l'association d'un procédé complémentaire pour l'atteinte des objectifs de traitement	Le procédé seul permet d'atteindre les objectifs; un traitement complémentaire est facultatif