JEAN-PHILIPPE LALIBERTÉ

# UTILISATION DES MÉTHODES MULTICRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION POUR LE CHOIX D'UN MEILLEUR SCÉNARIO DE GESTION DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS : CAS DU LAC SAINT-AUGUSTIN

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL ET DE GÉNIE DES EAUX
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2012

© Jean-Philippe Laliberté, 2012

## Résumé

Une action au niveau des sédiments du lac Saint-Augustin est essentielle pour contrôler le principal apport interne en phosphore qui accélère l'eutrophisation du lac. Plusieurs scénarios combinant dragage hydraulique, dragage mécanique, inactivation du phosphore à l'alun et recouvrement actif des sédiments ont été élaborés sur les zones les plus fortement contaminées du lac. L'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision permet de hiérarchiser les scores de performances de ces scénarios sur la base de critères technique, économique, environnemental et social.

L'inactivation du phosphore par l'alun suivie de la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire sur l'ensemble des zones fortement contaminées de même que le dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant sont les deux scénarios les plus performants. Les scénarios de dragage mécanique des sédiments contaminés arrivent bons derniers et derrière l'option statu quo.

## Abstract

Remediation actions scoped on the contaminated sediments of Lake Saint-Augustin are essential to control the main internal phosphorus intake that accelerates the eutrophication of the lake. Several restoration scenarios combining hydraulic and mechanical dredging, phosphorus inactivation with alum treatment and active capping using limestone are developed on the most heavily contaminated areas of the lake. The use of multicriteria methods for decision support helps to assess the best restoration scenario on the basis of technical, economic, environmental and social criteria.

The inactivation of phosphorus by alum followed by the application of a limestone cap on the most heavily contaminated areas of the lake as well as the hydraulic dredging of these areas with polymerisation and filtration of pumped sediments through a filter bag appear to be the two most efficient scenarios to implement at Lake Saint-Augustin on a large scale. Mechanical dredging scenarios come last, even behind the do-nothing option.

*À celles et ceux qui donnent espoir et qui persévèrent…*

*À Nicole qui m'a montré le chemin,*

*à Marie et son fils Raphaël,*

*et à celles et ceux que j'ai perdus en cours de route…*

## Remerciements


| | |
|---|---|
| Directrice de maîtrise : | Rosa Galvez, ing., Ph.D. |
| Professionnels de recherche : | Alexandre Gauthier, ing., M.Sc. |
| | Gaëlle Guesdon, M.Sc. |
| Techniciens : | Denis Jobin |
| | Christian Juneau |
| | Michel Bisping |
| Étudiants : | Boris Constantin (Candidat M.Sc.) |
| | Samuel Roy (Candidat M.Sc.) |
| | Inès Carine Singhe (Candidate Ph.D.) |
| Stagiaires : | Alice Giaccone (Università di Pisa) |
| | Giulia Muti (Università di Pisa) |
| Contributions externes : | Nathalie Gaudette (CBLSA) |
| | Alexandre Baker, M.ATDR (ville de Québec) |

# Table des matières

**RÉSUMÉ** ..... **II**

**ABSTRACT** ..... **III**

**REMERCIEMENTS** ..... **V**

**TABLE DES MATIÈRES** ..... **VI**

**LISTE DES TABLEAUX** ..... **IX**

**LISTE DES FIGURES** ..... **XII**

**CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE** ..... **14**

1.1 LE LAC SAINT-AUGUSTIN ..... 14
*1.1.1 Description générale du lac Saint-Augustin et de son bassin versant* ..... *16*
*1.1.2 Historique de la contamination* ..... *20*
*1.1.3 Description des problématiques* ..... *21*
1.2 LA CONTAMINATION AU LAC SAINT-AUGUSTIN ..... 23
*1.2.1 Les sédiments* ..... *23*
*1.2.2 Les eaux de surface* ..... *27*
*1.2.3 Initiatives réalisées et plan directeur* ..... *30*
1.3 LE PROJET DE MAÎTRISE ..... 31
*1.3.1 Hypothèses, but et objectifs* ..... *32*
1.4 ORGANISATION DU MÉMOIRE ..... 34

**CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES** ..... **36**

2.1 L'EUTROPHISATION ..... 36
*2.1.1 Les niveaux trophiques* ..... *38*
*2.1.2 Le phosphore* ..... *41*
2.2 LE PHOSPHORE ET LES SÉDIMENTS ..... 43
*2.2.1 Les facteurs d'influence sur le relargage du phosphore* ..... *45*
*2.2.2 La situation au lac Saint-Augustin* ..... *48*
2.3 LES MÉTAUX LOURDS ET LES SÉDIMENTS ..... 50
*2.3.1 Les facteurs d'influence sur le relargage des métaux lourds* ..... *51*
*2.3.2. La situation au lac Saint-Augustin* ..... *53*
2.4 LES STRATÉGIES DE GESTION DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS ..... 54
*2.4.1 La coagulation du phosphore par l'ajout d'alun* ..... *55*
*2.4.2 Le recouvrement actif des sédiments* ..... *57*
*2.4.3 Enlèvement du phosphore par dragage* ..... *59*
*2.4.4 Les autres stratégies pour la gestion des sédiments contaminés* ..... *64*
2.5 L'AIDE À LA DÉCISION EN ENVIRONNEMENT ..... 67
*2.5.1 Les méthodes multicritères d'aide à la décision disponibles* ..... *68*
*2.5.2 Les méthodes retenues pour application au cas du lac Saint-Augustin* ..... *74*
*2.5.3 Les étapes préliminaires aux méthodes multicritères d'aide à la décision* ..... *76*
*2.5.4 La méthode hiérarchique multicritères* ..... *77*
*2.5.5 La méthode ordinale de Holmes* ..... *83*

**CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES** ..... **86**

3.1 L'IDENTIFICATION DES ZONES FORTEMENT CONTAMINÉES ..... 86
3.2 LA CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS DE GESTION DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS ..... 93
*3.2.1 Le scénario A* ..... *94*
*3.2.2 Le scénario B* ..... *97*

*3.2.3 Le scénario C* ..... *98*
*3.2.4 Le scénario D* ..... *100*
3.3 LES CRITÈRES ET LES SOUS-CRITÈRES DE LA DÉCISION ..... 100
*3.3.1 Le critère économique* ..... *101*
*3.3.2 Le critère technique* ..... *104*
*3.3.3 Le critère social* ..... *109*
*3.3.4 Le critère environnemental* ..... *115*
3.4 L'ARBRE HIÉRARCHIQUE ET L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ ..... 120
*3.4.1 L'arbre hiérarchique* ..... *120*
*3.4.2 L'analyse de sensibilité* ..... *121*

**CHAPITRE 4 RÉSULTATS ..... 125**

4.1 LA DESCRIPTION DES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES SCÉNARIOS ..... 126
*4.1.1 Les caractéristiques techniques* ..... *127*
*4.1.2 Justifications des caractéristiques techniques* ..... *133*
4.2 L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SCÉNARIOS ..... 140
*4.2.1 L'investissement initial* ..... *140*
*4.2.2 Les mesures d'atténuation* ..... *143*
*4.2.3 Les coûts associés à la disposition/valorisation des sédiments* ..... *144*
*4.2.4 Les coûts d'entretien et de suivi* ..... *147*
4.3 LA CONSTRUCTION DU BARÈME D'ÉVALUATION ..... 151
4.4 LA MÉTHODE HIÉRARCHIQUE MULTICRITÈRES DE THOMAS SAATY ..... 157
*4.4.1 Situation I : L'égalité des poids des critères* ..... *157*
*4.4.2 Situation II : L'approche traditionnelle* ..... *158*
*4.4.3 Situation III : L'approche progressiste-écologique* ..... *159*
*4.4.4 Situation IV : Le gain de capital politique* ..... *161*
*4.4.5 Sommaire de l'analyse de sensibilité selon la méthode hiérarchique multicritères* ..... *162*
4.5 LA MÉTHODE ORDINALE DE HOLMES ..... 165
4.6 COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES MULTICRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION ..... 170

**CHAPITRE 5 DISCUSSION ..... 174**

5.1 LES RÉSULTATS DES MÉTHODES MULTICRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION ..... 174
5.2 LES SOUS-SCÉNARIOS DE GESTION DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS ..... 176
*5.2.1 Quelques commentaires importants concernant les scénarios de gestion des sédiments contaminés* ..... *177*
*5.2.2 La prise en compte de l'incertitude* ..... *179*
*5.2.3 Les variantes des procédés utilisés pour la construction des scénarios* ..... *180*
5.3 COMMENTAIRES ET RÉFLEXIONS SUR LA MÉTHODOLOGIE ..... 183
*5.3.1 Le choix des critères, des sous-critères et de leurs importances relatives* ..... *183*
*5.3.2 Le barème d'évaluation et les scénarios de gestion des sédiments contaminés* ..... *186*
*5.3.4 Les méthodes multicritères d'aide à la décision* ..... *188*
5.4 COMMENTAIRES PRÉLIMINAIRES À LA RÉALISATION À GRANDE ÉCHELLE ..... 191

**CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS ..... 193**

6.1 CONCLUSIONS DE LA MÉTHODE HIÉRARCHIQUE MULTICRITÈRES ET DE LA MÉTHODE ORDINALE DE HOLMES ..... 195
6.2 RECOMMANDATIONS ..... 196

**BIBLIOGRAPHIE ..... 198**

**ANNEXE A SOMMAIRE DES INITIATIVES PRÉSENTÉES DANS LE PLAN DIRECTEUR DU LAC SAINT-AUGUSTIN ..... 208**

**ANNEXE B DIAGRAMME DE SOLUBILITÉ DE L'ALUMINIUM ..... 209**

**ANNEXE C COMPARAISON DES CRITÈRES DE SOLS DU MDDEP AVEC LES VALEURS RETROUVÉES AU LAC SAINT-AUGUSTIN ..... 210**

**ANNEXE D OPTIONS DE GESTION ASSOCIÉES AUX DIFFÉRENTS NIVEAUX DE CONTAMINATION ..... 211**

**ANNEXE E SONDAGE DE CONSULTATION ET RÉPONSES ..... 212**

**ANNEXE F CARACTÉRISATION AVANCÉE DES PHASES SOLIDE ET LIQUIDE DU DRAGAGE DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS DU LAC SAINT-AUGUSTIN ..... 216**

F.1 L'ÉCHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS ..... 217
*F.1.1 Le dragage mécanique ..... 219*
*F.1.2 Le dragage hydraulique à succion ..... 219*
F.2 PROTOCOLE DE CARACTÉRISATION DES PHASES ISSUES DU DRAGAGE ..... 221
F.3 LES ANALYSES RÉALISÉES ET LES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS EN LABORATOIRE ..... 224
F.4 RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES DE LA CARACTÉRISATION DÉTAILLÉE DES PHASES ISSUES DU DRAGAGE ..... 226
*F.4.1 La phase solide ..... 226*
*F.4.2 La phase liquide et le test de lixiviation ..... 228*

**ANNEXE G EXEMPLES DE CALCULS ..... 231**

G.1 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES SOUS-SCÉNARIOS (TABLEAU 19) ..... 231
G.2 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DE L'INVESTISSEMENT INITIAL DU PROJET (TABLEAU 22) ..... 233
G.3 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES MESURES D'ATTÉNUATION (TABLEAU 24) ..... 234
G.4 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DE LA DISPOSITION/VALORISATION DES SÉDIMENTS (TABLEAU 25) ..... 235

**ANNEXE H MATRICES DE COMPARAISON DES NIVEAUX DÉFINIS POUR L'UTILISATION DE LA MÉTHODE HIÉRARCHIQUE MULTICRITÈRES ..... 236**

H.1 MATRICES DE COMPARAISON DES CRITÈRES POUR CHACUNE DES SITUATIONS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ ..... 236
H.2 MATRICES DE COMPARAISON DES SOUS-CRITÈRES ..... 237
H.3 MATRICES DE COMPARAISON DES PERFORMANCES DES SOUS-SCÉNARIOS EN FONCTION DES SOUS-CRITÈRES ..... 239
*H.3.1 Les sous-critères économiques ..... 240*
*H.3.2 Les sous-critères techniques ..... 241*
*H.3.3 Les sous-critères sociaux ..... 243*
*H.3.3 Les sous-critères environnementaux ..... 244*

**ANNEXE I TABLEAUX DE CALCUL DU VECTEUR DE PRIORITÉ GLOBALE POUR LES SITUATIONS I À IV ..... 246**

# Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques morphologiques du lac Saint-Augustin..... 17
Tableau 2: Répartition du zonage dans le bassin versant du lac Saint-Augustin..... 18
Tableau 3: Historique des actions aggravantes au lac Saint-Augustin ..... 21
Tableau 4: Paramètres physico-chimiques des sédiments du lac Saint-Augustin ..... 24
Tableau 5: Phosphore total dans les sédiments du lac Saint-Augustin ..... 24
Tableau 6: Concentrations moyennes et écart-types des principaux métaux lourds retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin** ..... 26
Tableau 7: pH, conductivité et turbidité des eaux du lac Saint-Augustin ..... 27
Tableau 8: Indicateurs d'eutrophisation pour les eaux du lac Saint-Augustin (Tiré de Parant, 2007) ..... 29
Tableau 9: Métaux lourds dans les eaux du lac Saint-Augustin..... 30
Tableau 10: Symptômes de l'eutrophisation et niveaux trophiques (Tiré de Galvez-Cloutier et *al.*, 2002) ..... 40
Tableau 11: Définitions des importances relatives pour la comparaison des composantes de chaque niveau (Échelle sémantique de Thomas Saaty)..... 79
Tableau 12: Critères de qualité des sédiments d'eau douce..... 89
Tableau 13 : Comparaison des données de caractérisation aux seuils pour l'identification des zones fortement contaminées au lac Saint-Augustin ..... 91
Tableau 14: Superficies des zones à haute contamination au lac Saint-Augustin ..... 93
Tableau 15: Sommaire des nuisances appréhendées selon la stratégie de gestion retenue ..... 111
Tableau 16: Synthèse des situations à représenter dans l'analyse de sensibilité..... 122
Tableau 17 : Importances relatives des sous-critères de la décision ..... 124
Tableau 18 : Références utilisées pour la description des caractéristiques techniques des scénarios/sous-scénarios ..... 126
Tableau 19: Caractéristiques techniques des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin ..... 129
Tableau 20: Spécificités techniques des types de dragues envisagées au lac Saint-Augustin**.... 134
Tableau 21: Caractéristiques des sites potentiels pour le traitement des sédiments contaminés** ..... 136
Tableau 22: Données économiques pour l'investissement initial des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin ..... 141
Tableau 23: Personnes contactées pour les estimations des coûts..... 142
Tableau 24: Données économiques pour la mise en place de rideaux de turbidité ..... 144
Tableau 25: Données économiques pour les coûts relatifs à la valorisation des sédiments contaminés après dragage ..... 146
Tableau 26: Niveaux d'entretien et de suivi requis par procédé ..... 148
Tableau 27: Analyses à effectuer et coûts par type d'échantillons..... 148
Tableau 28: Données économiques pour les coûts d'entretien et de suivi des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin ..... 150
Tableau 29: Grille d'évaluation des sous-scénarios pour les sous-critères économiques, techniques, environnementaux et sociaux..... 153
Tableau 30: Situation I – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario ... 158
Tableau 31: Situation II – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario .. 159
Tableau 32: Situation III – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario . 160
Tableau 33: Situation IV – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario . 162

Tableau 34: Scores de performance obtenus par sous-scénario pour l'ensemble des situations de l'analyse de sensibilité ..... 162
Tableau 35: Résultats de la méthode ordinale de Holmes par critère (économique, technique, environnemental et social) ..... 166
Tableau 36: Classification finale des sous-scénarios selon la méthode ordinale de Holmes..... 170
Tableau 37: Sommaire du classement global des sous-scénarios pour chaque méthode ..... 171
Tableau 38: Sommaire des positions des sous-scénarios par critère pour chaque méthode..... 172
Tableau C - 1 : Critères de sols en relation avec les concentrations retrouvées au lac Saint-Augustin ..... 210
Tableau D - 1 : Options de gestion disponibles selon le niveau de contamination retrouvé dans le sol selon le MDDEP ..... 211
Tableau F - 1 : Procédés *in situ* appliqués dans les enclos lors des essais en plate-forme de 2009 et 2011 ..... 218
Tableau F - 2 : Concentrations en phosphore total et concentrations moyennes des principaux métaux lourds retrouvées dans les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement au lac Saint-Augustin..... 227
Tableau F - 3 : Concentrations moyennes en phosphore soluble et métaux lourds obtenues dans le lixiviat synthétique pour les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement après TCLP ..... 228
Tableau F - 4 : Résultats de caractérisation des eaux issues du dragage hydraulique obtenus par le CEAEQ et comparaison avec les critères pour la prévention de la contamination** ..... 229
Tableau H - 1 : Matrice de comparaison des critères pour la situation I – L'égalité des poids des critères ..... 236
Tableau H - 2 : Matrice de comparaison des critères pour la situation II - L'approche traditionnelle ..... 237
Tableau H - 3 : Matrice de comparaison des critères pour la situation III – L'approche progressiste-écologique ..... 237
Tableau H - 4 : Matrice de comparaison des critères pour la situation IV - Le gain de capital politique ..... 237
Tableau H - 5 : Matrice de comparaison des sous-critères ÉCONOMIQUES..... 238
Tableau H - 6 : Matrice de comparaison des sous-critères TECHNIQUES..... 238
Tableau H - 7 : Matrice de comparaison des sous-critères SOCIAUX..... 238
Tableau H - 8 : Matrice de comparaison des sous-critères ENVIRONNEMENTAUX..... 239
Tableau H - 9 : Matrice de comparaison – Investissement initial du projet ..... 240
Tableau H - 10 : Matrice de comparaison – Coût d'entretien et de suivi ..... 240
Tableau H - 11 : Matrice de comparaison – Disponibilité des matériaux et des équipements..... 240
Tableau H - 12 : Matrice de comparaison – Disposition et valorisation des résidus (sédiments) .. 241
Tableau H - 13 : Matrice de comparaison – Durabilité de la solution ..... 241
Tableau H - 14 : Matrice de comparaison – Performance de la solution/enlèvement des contaminants ..... 241
Tableau H - 15 : Matrice de comparaison – Turbidité de l'eau et potentiel de relargage..... 242
Tableau H - 16 : Matrice de comparaison – Faisabilité de la solution..... 242
Tableau H - 17 : Matrice de comparaison – Flexibilité de la solution..... 242
Tableau H - 18 : Matrice de comparaison – Nuisances subies par les travailleurs et les riverains. 243
Tableau H - 19 : Matrice de comparaison – Acceptation du projet par le public..... 243
Tableau H - 20 : Matrice de comparaison – Accessibilité financière du projet par les contribuables ..... 243
Tableau H - 21 : Matrice de comparaison – Gain social et restauration des usages du lac..... 244

Tableau H - 22 : Matrice de comparaison – Intégration à la communauté de façon structurante 244
Tableau H - 23 : Matrice de comparaison – Récupération des sédiments et/ou des matériaux ... 244
Tableau H - 24 : Matrice de comparaison – Gestion éco-responsable des contaminants..... 245
Tableau H - 25 : Matrice de comparaison – Qualité de l'eau et de l'air ..... 245
Tableau H - 26 : Matrice de comparaison – Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution..... 245
Tableau I - 1 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation I (L'égalité des poids des critères) : Écon. = Tech. = Env. = Soc..... 246
Tableau I - 2 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation II (L'approche traditionnelle) : [Écon. = Tech.] > [Env. = Soc.] ..... 247
Tableau I - 3 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation III (L'approche progressiste-écologique) : [Env. = Soc.] > [Écon. = Tech.]..... 248
Tableau I - 4 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation IV (Le gain de capital politique) : [Tech. = Soc.] > Écon. > Env. ..... 249

# Liste des figures

Figure 1: Localisation du lac Saint-Augustin (Tiré de Bourget et *al.*, 2011) ..... 16
Figure 2: Vocation du territoire du bassin versant du lac Saint-Augustin (Tiré de Bourget et *al.*, 2011) ..... 18
Figure 3: Carte topographique du territoire avoisinant le lac Saint-Augustin (Tiré de Bourget et *al.*, 2011) ..... 19
Figure 4: Évolution du territoire avoisinant le lac Saint-Augustin (Roberge et *al.*, 2002 ; GoogleEarth, 2011) ..... 20
Figure 5: Spéciation chimique du phosphore dans les sédiments du lac Saint-Augustin..... 25
Figure 6: Disque Secchi ..... 28
Figure 7 : Position de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin par rapport aux projets réalisés à ce jour ..... 32
Figure 8: Eaux eutrophes des canaux du bassin versant du fleuve Serchio, Provincia di Lucca, Toscane, Italie (Photos a, b et c : Jean-Philippe Laliberté – Photo d : Paolo Basile) ..... 38
Figure 9: Classification des niveaux trophiques des lacs et réservoirs au Québec (MDDEP, 2011a) 39
Figure 10: Comparaison entre l'eutrophisation naturelle et l'eutrophisation anthropique (MDDEP, 2011a) ..... 40
Figure 11: Cycle du phosphore dans un lac (Adapté de Warwick, 2010)..... 42
Figure 12: Mécanismes de relargage du phosphore (Tiré de Consortium DDM – ProFaune, 2005) 44
Figure 13: Dynamique saisonnière des lacs en milieu tempéré (Tiré de Campbell et Reece, 2004) 44
Figure 14: Diagramme Eh-Ph du fer (Tiré de Fetter, 1999) ..... 46
Figure 15 : Diagramme de distribution du carbonate de calcium selon le pH (Tiré de Hubbard, 2002) ..... 47
Figure 16: Cycle des métaux lourds dans un lac (Tiré de Sigg et *al.*, 2006)..... 52
Figure 17: Dragage mécanique (haut) et hydraulique par succion (bas) (Tiré de Mattson et *al.*, 2003) ..... 62
Figure 18 : Exemple d'un arbre hiérarchique pour la méthode hiérarchique multicritères ..... 78
Figure 19: Méthodologie à suivre pour la détermination des poids des composantes de chaque niveau..... 80
Figure 20 : Calcul des poids des critères pour l'exemple donné à partir de la figure 18 ..... 80
Figure 21: Matrice des rangs pondérés (Tiré de Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011) ..... 83
Figure 22: Exemple d'application de la méthode ordinale de Holmes..... 84
Figure 23: Carte bathymétrique et sites d'échantillonnage au lac Saint-Augustin..... 87
Figure 24: Zones fortement contaminées au lac Saint-Augustin..... 92
Figure 25 : Scénario A ..... 95
Figure 26: Réinsertion des sédiments dragués dans le milieu récepteur (Tiré de USEPA and USACE, 2004) ..... 97
Figure 27: Scénario B ..... 98
Figure 28: Scénario C ..... 100
Figure 29: Arbre hiérarchique pour le choix du meilleur scénario au lac Saint-Augustin..... 121
Figure 30: Éléments à considérer pour le dragage de sédiments contaminés..... 128
Figure 31: Sites potentiels pour le traitement des sédiments (Adapté de Ville de Québec, 2009) 136
Figure 32: Résultats de la situation I — Méthode hiérarchique multicritères ..... 158
Figure 33: Résultats de la situation II — Méthode hiérarchique multicritères ..... 159
Figure 34: Résultats de la situation III - Méthode hiérarchique multicritères..... 160
Figure 35: Résultats de la situation IV — Méthode hiérarchique multicritères ..... 161

Figure 36: Histogrammes des performances totales pour chaque situation de l'analyse de sensibilité..... 163
Figure B - 1 : Diagramme de solubilité de l'aluminium (Tiré de Crittenden et *al.*, 2005) ..... 209
Figure F - 1 : Schéma récapitulatif des activités réalisées pour la caractérisation avancée des phases issues du dragage des sédiments du lac Saint-Augustin..... 217
Figure F - 2 : Image des enclos (gauche) et positionnement des plates-formes aux étés 2009 et 2011 (droite)..... 218
Figure F - 3 : Benne Ekman utilisée pour l'échantillonnage des sédiments au lac Saint-Augustin. 219
Figure F - 4 : Pompage des sédiments (gauche) et exutoire du tuyau de pompage (droite)..... 220
Figure F - 5 : Polymérisation des sédiments (gauche) et sac filtrant (droite)..... 220
Figure F - 6 : Spectromètre d'absorption atomique à flamme (gauche) et échantillonneur automatique (droite) utilisé pour la caractérisation des échantillons en métaux lourds ..... 224
Figure F - 7 : Spectrophotomètre utilisé pour la caractérisation des échantillons liquides en phosphore dissous par mesure de l'absorbance à 880 nm..... 225

# Chapitre 1 Introduction générale

## 1.1 Le lac Saint-Augustin

Au fil des dernières décennies, les lacs et rivières du Québec sont devenus des lieux de plus en plus prisés par la population. La pression engendrée par cette présence humaine et le changement sur le territoire qui s'impose ont fortement affecté la qualité des plans d'eau en milieu urbain. Dans certains cas, l'intensification des activités humaines sur un bassin versant peut causer une augmentation considérable de la teneur en nutriments des eaux alimentant les lacs et réservoirs. Parmi ces nutriments, on retrouve le phosphore naturellement limitant des écosystèmes d'eaux douces et dont l'excès cause l'eutrophisation (Ryding and Rast, 1994). Dans une étude regroupant les niveaux trophiques de 154 lacs au Québec, le lac Saint-Augustin occupe la première place sur la liste des lacs nécessitant les mesures de restauration les plus immédiates (Galvez-Cloutier and Sanchez, 2007). Ce lac est dans un état si extrême d'eutrophisation qu'il a été le sujet de nombreuses études avant d'être sélectionné en 2008 pour la réalisation d'un projet pilote de restauration dans le cadre du Plan d'intervention sur les algues bleu-vert 2007-2017 du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

Plusieurs projets de maîtrise et de doctorat se sont déroulés tout au long du processus global de restauration du lac Saint-Augustin au cours des dernières années. Ceux-ci ont été enchaînés les uns après les autres, les résultats des études précédentes alimentant la suivante. Les études réalisées portaient notamment sur la compréhension du processus d'eutrophisation anthropogénique et sur le développement de méthodes de restauration adaptées au cas du lac Saint-Augustin. En 2004, Dominguez a souligné la capacité de la roche calcaire à retenir le phosphore ainsi que certains métaux lourds à travers des essais de lixiviation (Dominguez, 2004). Trois ans plus tard, Brin évaluait l'importance des conditions physico-chimiques sur la biodisponibilité du phosphore et des métaux lourds contenus dans les sédiments (Brin, 2007). La même année, Parant évaluait la performance des procédés de coagulation/floculation à l'alun et du recouvrement actif de pierre calcaire à l'aide d'essais en colonnes grandeur nature au laboratoire d'environnement de l'université Laval (Parant, 2007). Une caractérisation détaillée des sédiments du lac Saint-Augustin

selon 42 points d'échantillonnage a également été réalisée et a révélé la présence de zones où la contamination est plus importante.

Dans le cadre du Plan d'intervention sur les algues bleu-vert du MDDEP, le lac Saint-Augustin a été choisi avec 3 autres lacs au Québec pour la réalisation de projets pilotes pour la restauration des lacs eutrophes. Le projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin se divise en deux volets distincts visant à tester différents procédés de gestion des sédiments contaminés à l'aide d'essais en enclos sur une plate-forme flottante. Dans chacun des volets, les enclos ont été ancrés dans les sédiments et installés de manière à isoler une colonne d'eau du reste du lac. Différents procédés ont alors été implantés dans chacun des enclos et des niveaux de performances pour chaque procédé ont pu être déterminés.

Le volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin a été conduit à l'été 2009 par Alexandre Bourget et portait sur l'inactivation du phosphore et le confinement des contaminants. Plus spécifiquement, la coagulation à l'alun du phosphore particulaire et des colloïdes de même que la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sont deux des procédés qui ont été testés. Le dernier procédé testé dans le cadre de ce volet est une combinaison des deux premiers, où l'alun était d'abord ajouté à la colonne d'eau et était suivi par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable.

Le volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin a été conduit à l'été 2011 par Boris Constantin et portait cette fois sur l'enlèvement des sédiments contaminés par dragage. Plus spécifiquement, le dragage hydraulique à succion et le dragage mécanique des sédiments sont les deux procédés qui ont été testés à l'échelle pilote. Par ailleurs, les opérations de dragage des sédiments génèrent une phase liquide et une phase solide qu'il convient de séparer. Différentes techniques ont été testées pour ce faire dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin, notamment la séparation gravitaire, la floculation/filtration des boues à travers un sac filtrant ainsi que la centrifugation des boues par l'utilisation d'un hydrocyclone.

Fort des résultats de performance obtenus pour chaque procédé testé dans les volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin, différents scénarios de gestion

des sédiments contaminés peuvent être construits à l'échelle du lac à partir des procédés testés à l'échelle pilote. Une fois construits et détaillés, ces scénarios peuvent être confrontés les uns aux autres à travers l'utilisation d'outils d'aide à la décision dans le but de proposer une solution qui offre le meilleur compromis possible parmi des critères et des sous-critères bien définis pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

### 1.1.1 Description générale du lac Saint-Augustin et de son bassin versant

Le lac Saint-Augustin est situé dans la zone urbaine de la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures, à environ 15 km du centre-ville de Québec. Ses coordonnées géographiques sont 46°42' N et 71°22' O à 71°36'O. La figure 1 montre la localisation géographique du lac et de son bassin versant par rapport au territoire de la ville de Québec. On peut voir sur cette figure que la rive sud du lac est plus densément développée et que l'autoroute Félix-Leclerc passe très près de la rive-nord du lac. Ces éléments sont repris plus en détails dans la section 1.1.3 portant sur la description des problématiques du lac Saint-Augustin.

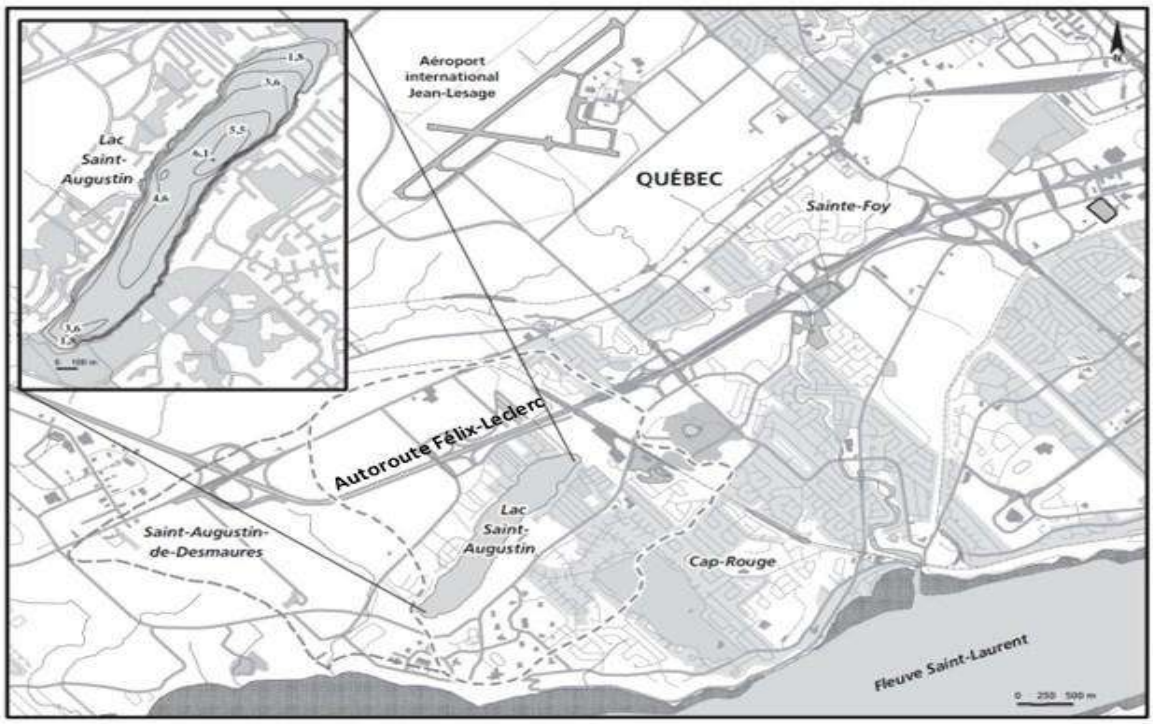


**Figure 1: Localisation du lac Saint-Augustin (Tiré de Bourget et *al.*, 2011)**

Les caractéristiques morphologiques du lac sont résumées dans le tableau 1. Ces valeurs sont retrouvées dans la grande majorité des études ayant été réalisées sur le lac Saint-

Augustin (Bourget et *al.*, 2011 ; Brin, 2007 ; Parant, 2007 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Dominguez, 2004 ; Roberge et *al.*, 2002). Pour deux zones situées au sud-est du lac, les eaux de ruissellement ont été détournées du bassin versant naturel, d'où le paramètre de superficie du bassin versant modifié. Celui-ci représente la superficie pour laquelle le ruissellement contribue réellement à l'alimentation du lac (Bourget et *al.*, 2011).

**Tableau 1: Caractéristiques morphologiques du lac Saint-Augustin**

| Paramètres | | Unité | Valeurs |
|---|---|---|---|
| Lac Saint-Augustin | Longueur maximale | km | 2,1 |
| | Largeur maximale | m | 300 |
| | Largeur moyenne | m | 290 |
| | Périmètre du lac | km | 4,5 |
| | Superficie du lac | km² | 0,6 |
| | Profondeur maximale | m | 6,45 |
| | Profondeur moyenne | m | 3,3 |
| | Volume | $\times 10^6$ m³ | 2,25 - 2,38 |
| | Temps de renouvellement des eaux | an | 0,42 - 0,58 |
| Bassin versant | Superficie du bassin versant naturel | km² | 7,46 |
| | Superficie du bassin versant modifié | km² | 6,3 |

La vocation du territoire à l'intérieur du bassin versant du lac Saint-Augustin est illustrée à la figure 2 (Consortium DDM – ProFaune, 2005). On y constate la grande proportion de zones blanches qui représentent des surfaces imperméables. L'imperméabilisation des surfaces a pour principales conséquences la diminution du temps de réponse du bassin versant et l'augmentation du volume de ruissellement suite à une pluie (Brière, 2006). Sur cette figure, la portion nord-est du lac Saint-Augustin est surtout utilisée pour l'agriculture et peu d'arbres bordent les rives en général, à l'exception d'une mince bande forestière au sud-est et d'une zone plus épaisse au sud.

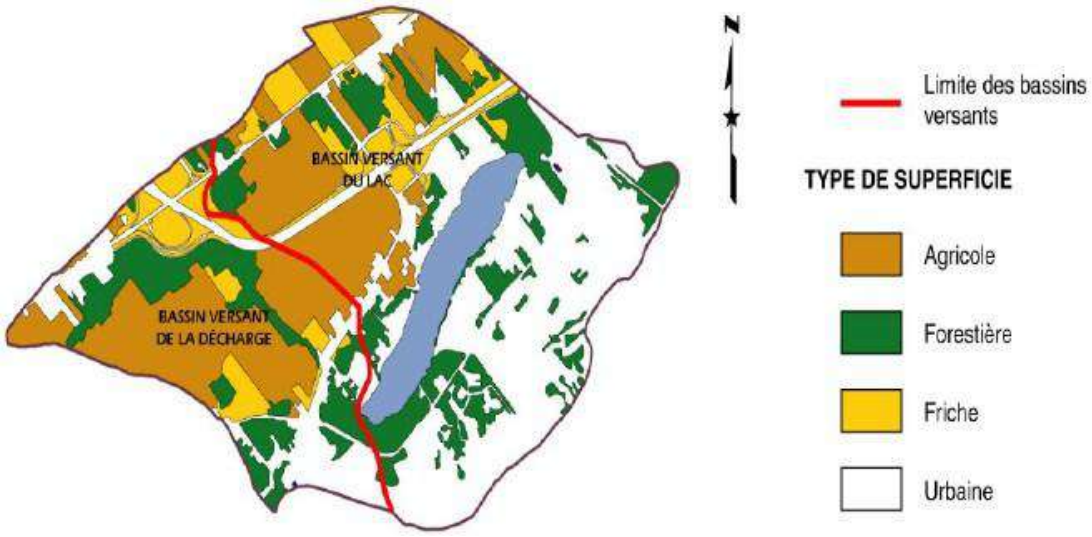


**Figure 2: Vocation du territoire du bassin versant du lac Saint-Augustin (Tiré de Bourget et *al.*, 2011)**

Le tableau 2 indique la vocation relative du sol par rapport à la superficie totale du bassin versant (Bouchard-Valentine, 2004). On y constate déjà la grande proportion des zones urbaines et agricoles (80 %) sur lesquelles les eaux de ruissellement et de percolation peuvent être contaminées notamment en phosphore et en métaux lourds avant de rejoindre le lac (Brin, 2007 ; Dominguez, 2004).

**Tableau 2: Répartition du zonage dans le bassin versant du lac Saint-Augustin**

| Vocation du sol | % de la superficie du bassin versant |
|---|---|
| **Zonage forestier** | 20 % |
| **Zonage agricole** | 23 % |
| **Zonage urbain** | 57 % |

La topographie aux abords du lac Saint-Augustin révèle une zone de plus fort dénivelé au sud-est du lac, là où une importante zone urbaine génère des eaux de ruissellement qui sont rapidement acheminées au plan d'eau suite à forte pluie (Brière, 2006). À l'inverse, la pente du terrain est beaucoup plus faible sur la rive nord. La décharge se trouve à la pointe sud du lac et le débit moyen mesuré d'avril à octobre 1978 par Aubin était de 0,54 $m^3/s$ (Dominguez, 2004). La figure 3 montre la carte topographique sur laquelle se trouvent des courbes de niveau pour le bassin versant du lac Saint-Augustin.

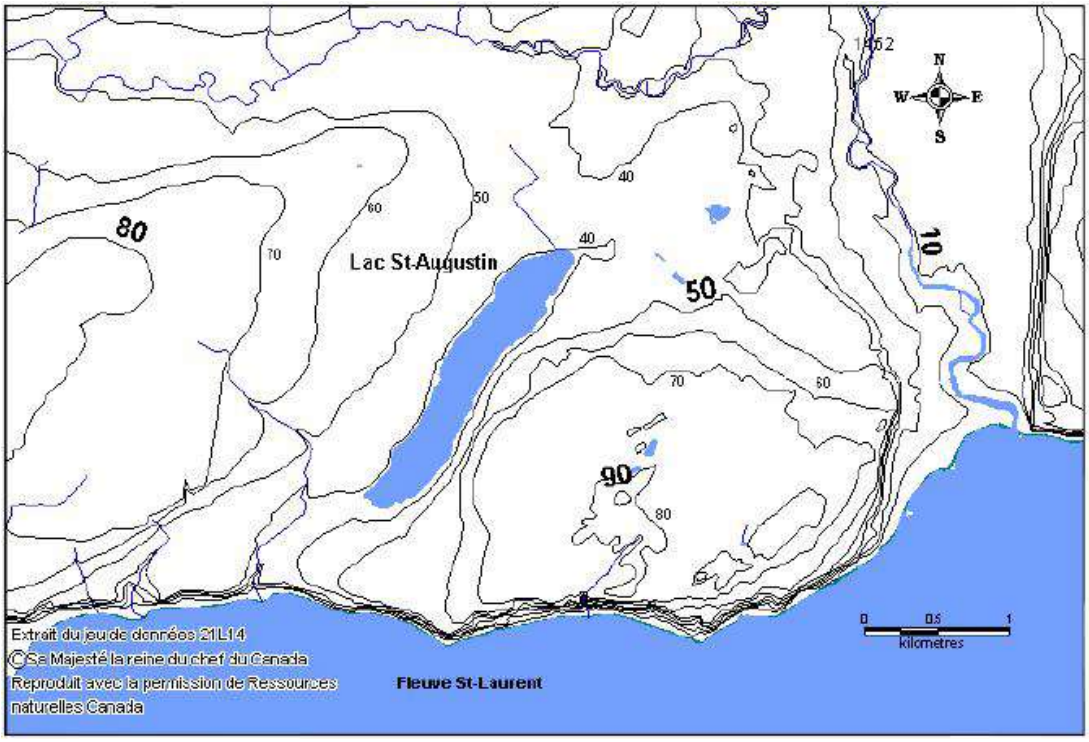


**Figure 3: Carte topographique du territoire avoisinant le lac Saint-Augustin (Tiré de Bourget et *al.*, 2011)**

Le bilan hydrologique de la région du bassin versant du lac Saint-Augustin révèle une précipitation moyenne annuelle de 1117 mm d'eau. De ce nombre, 223 mm alimentent le lac directement de la surface par ruissellement. Des 894 mm restant qui s'infiltrent, 554 mm sont perdus par évapotranspiration et 340 mm rejoignent la nappe souterraine (Pérez-Arzola et *al.*, 2006). Le bassin versant du lac Saint-Augustin reçoit donc un volume important en eau qui s'infiltre ou ruisselle selon le niveau d'urbanisation.

Le bassin versant du lac Saint-Augustin se trouve sur des dépôts fluvioglaciaires provenant des eaux de fonte de la dernière glaciation (10 000 ans) et sont principalement composés de sable et de gravier. Ces dépôts sont présents sur toute la longueur du lac et présentent une corrélation avec la topographie du bassin versant présentée à la figure 3. Une zone de dépôt sablonneux est également présente au sud du lac. Le lac lui-même repose sur un dépôt de shale noir intercalé de grès. La carte topographique du lac Saint-Augustin présentée à la figure 3 fait ressortir une petite vallée dans le sens de la longueur du lac qui amène les eaux vers le point le plus bas : le lac Saint-Augustin. Les eaux souterraines du bassin versant du lac Saint-Augustin se déplacent du nord-ouest au sud-est et alimentent le lac par en-

dessous. La zone de recharge des eaux souterraines qui alimentent le lac est donc située au nord du lac Saint-Augustin. La recharge du lac par les eaux souterraines calculée de 1990 à 2004 est de $1{,}92\times10^{6}$ m³/an et est nulle de mai à octobre. Le principal apport en eaux au lac Saint-Augustin se fait donc via les eaux souterraines du bassin versant et par un réseau de drainage superficiel et intermittent (Pérez-Arzola et *al.*, 2006 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2006).

### 1.1.2 Historique de la contamination

L'histoire entourant la dégradation du lac Saint-Augustin est fortement corrélée avec l'occupation et la gestion du territoire au fil des dernières décennies. La figure 4 montre l'évolution du territoire bordant le lac Saint-Augustin de 1937 à aujourd'hui. Sur cette figure, les zones agricoles et forestières très présentes en 1937 ont lentement reculé pour donner naissance à des zones urbaines à compter de 1953. L'autoroute Félix-Leclerc a été construite en 1977 et a généré, en combinaison avec les zones agricoles et urbaines avoisinantes, des apports importants en sels de déglaçage, en hydrocarbures, en phosphore et en métaux lourds pendant plusieurs décennies (Roberge et *al.*, 2002).

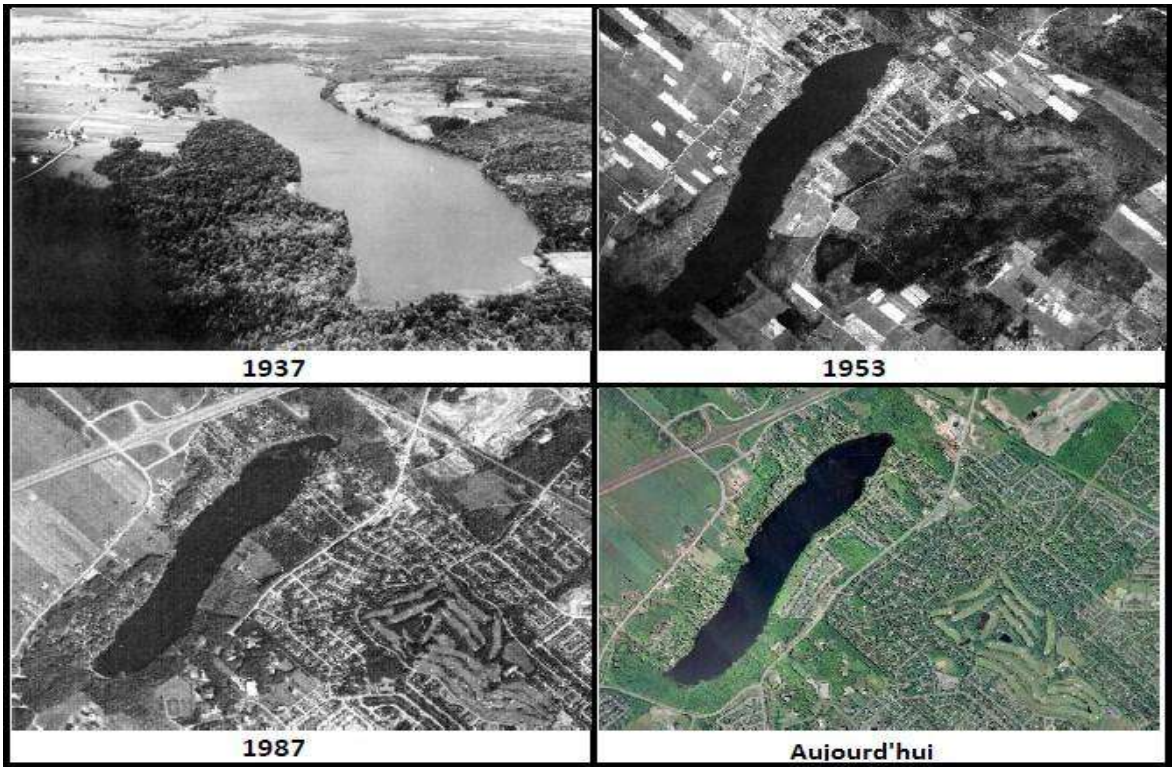


**Figure 4: Évolution du territoire avoisinant le lac Saint-Augustin (Roberge et *al.*, 2002 ; GoogleEarth, 2011)**

Plus spécifiquement, l'utilisation prolongée d'engrais riche en phosphore pour des fins agricoles a entraîné le début de la dégradation de l'état de santé du lac Saint-Augustin dans la première moitié du 20e siècle. L'urbanisation et la construction de l'autoroute Félix-Leclerc dans la deuxième moitié du siècle ont causé l'aggravation de l'état de santé précaire du lac en y ajoutant une contamination en métaux lourds, en engrais, en huiles et graisses, en sels de déglaçage en plus d'ajouter un apport supplémentaire en phosphore via les installations septiques individuelles non conformes des résidences non reliées au réseau d'égouts (Roberge et *al.*, 2002). Une base d'hydravions a également été en service pendant de nombreuses années (Galvez-Cloutier et *al.*, 2003). Tous ces changements ont entraîné un enrichissement en contaminants des eaux de ruissellement et des eaux souterraines qui alimentent le lac et sont responsables des problématiques actuellement observées.

Le tableau 3 présente un résumé des principaux changements ayant eu lieu dans l'occupation du territoire depuis 1860, alors que le lac était à un stade intermédiaire de productivité primaire (Roberge et *al.*, 2002). L'origine des problématiques actuellement retrouvées au lac Saint-Augustin peut désormais être expliquée et des actions de contrôle pour les sources externes de contamination peuvent être proposées. Une fois les sources externes contrôlées, des actions concernant les sources internes peuvent être envisagées.

**Tableau 3: Historique des actions aggravantes au lac Saint-Augustin**

| | |
|---|---|
| **1860** | Stade intermédiaire de productivité |
| **1760 - 1900** | Début des activités humaines (agriculture et élevage) autour du lac |
| **1900 - 1905** | Changements paléolimnologiques possiblement dus à un déboisement lié à l'extension de l'agriculture |
| **1938 - 1950** | Début de la dégradation de l'eau du lac et de l'utilisation massive de fertilisants artificiels |
| **1960 - 1970** | Installation des riverains et transformation des résidences pour devenir permanentes |
| **1973 - 1984** | Diatomées retrouvées caractéristiques des milieux eutrophes |
| **1977** | Construction de l'autoroute Félix-Leclerc |

### 1.1.3 Description des problématiques

Les problématiques retrouvées au lac Saint-Augustin font suite à l'augmentation de la pression anthropogénique sur le milieu récepteur et sont présentes depuis déjà plusieurs

décennies. Aujourd'hui, les sédiments du lac sont lourdement contaminés notamment en phosphore et en métaux lourds, conséquence directe des fosses septiques non conformes des résidences non raccordées à un réseau d'égouts, de l'agriculture autrefois intensive, du développement résidentiel et du ruissellement provenant de l'autoroute Félix-Leclerc et des zones urbaines avoisinantes (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Roberge et *al.*, 2002). Comme le lac Saint-Augustin est de type artésien, son principal apport en eau provient des eaux souterraines de son bassin versant (Pérez-Arzola et *al.*, 2006 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2006) qui doivent traverser une matrice de sédiments contaminés avant de rejoindre la colonne d'eau. Dépendamment des conditions physico-chimiques retrouvées au fond du lac, il peut y avoir relargage du phosphore et des métaux lourds contenus dans les sédiments (Brin, 2007). L'action du vent et des embarcations motorisées en combinaison avec la faible profondeur de la colonne d'eau favorise la remise en suspension des sédiments lâches et non consolidés du lac Saint-Augustin. Ces éléments ne sont pas à négliger dans la compréhension du phénomène de relargage des contaminants.

Bien que les conditions physico-chimiques retrouvées au fond du lac ne suggèrent pas le relargage immédiat des métaux lourds, le relargage du phosphore par les sédiments a pour principal effet d'accélérer dramatiquement le processus d'eutrophisation responsable des problématiques actuellement observées (Brin, 2007 ; Parant, 2007 ; Dominguez, 2004). Les sédiments représentent donc un réservoir important de contaminants et constituent la principale source interne en phosphore pour les eaux du lac Saint-Augustin (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012). Cet aspect sera couvert plus en détails dans le chapitre 2.

Par ailleurs, plusieurs floraisons de cyanobactéries ont été répertoriées dans le passé au lac Saint-Augustin. Les cyanobactéries sont des êtres photosynthétiques ayant une remarquable capacité d'adaptation. Sensibles à la température, à la lumière et à la quantité de phosphore disponible, de telles floraisons peuvent apparaître en quelques jours seulement. La particularité caractéristique des cyanobactéries concerne les toxines qu'elles produisent et qui peuvent engendrer des irritations cutanées, des lésions hépatiques ou cérébrales et peuvent même entrainer la mort de la faune et des individus exposés (Bouchard-Valentine, 2004 ; IETC, 1999).

De plus, une source externe de contamination en sels de déglaçage, en phosphore et en métaux lourds provient des fossés de drainage de l'autoroute Félix-Leclerc qui drainent également une portion des terres agricoles situées au nord du lac. Chaque année, le Ministère des Transports du Québec utilise environ 96 tonnes de sels par km de route pour les deux voies. En près de 30 ans, la conductivité électrique de l'eau du lac est passée de 350 µS/cm en 1976 à 900 µS/cm en 2004 (Galvez-Cloutier et *al.*, 2006). En 2009, les conductivités retrouvées dans les eaux du lac étaient du même ordre de grandeur que celles de 2004 (Bourget et *al.*, 2011).

Aujourd'hui, les usages du lac sont limités en été, voire interdits lors d'épisodes de floraisons de cyanobactéries. En 2001, à la suite d'un avis d'interdiction de baignade, la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures est allée de l'avant avec le projet « la Grande Corvée du bassin versant du lac Saint-Augustin » qui avait pour but ultime la restauration complète du lac et de ses usages.

## 1.2 La contamination au lac Saint-Augustin

### 1.2.1 Les sédiments

Les sédiments du lac Saint-Augustin sont d'une texture limno-sablonneuse (Dominguez, 2004) et sont principalement contaminés avec du phosphore et des métaux lourds. Alors que le phosphore représente un nutriment naturellement limitant dans les écosystèmes d'eau douce et dont l'excès cause l'eutrophisation (Ryding and Rast, 1994), les métaux lourds sont reconnus pour le risque qu'ils causent sur la santé et l'environnement (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a). En 1993, une première caractérisation des métaux lourds contenus dans les sédiments a été réalisée par Landry (1993). Un peu plus tard, les travaux de Dominguez (2004) et de Brin (2007) ont permis une caractérisation détaillée des sédiments selon 42 points quadrillant toute la superficie du lac. Les valeurs moyennes et les écart-types des principaux paramètres physico-chimiques retrouvés dans ces 42 échantillons de sédiments et obtenus lors de ces travaux sont présentés au tableau 4 (Brin, 2007).

**Tableau 4: Paramètres physico-chimiques des sédiments du lac Saint-Augustin**

| Paramètres | Unité | Valeur |
|---|---|---|
| **pH** | - | 7,6 ± 0,2 |
| **pE** | mV | 37 ± 69 |
| **Conductivité** | µS | 797 ± 12 |
| **Humidité** | % | 75,0 ± 10,6 |
| **Matière organique** | % | 11,2 ± 3,0 |
| **Alcalinité** | mg $CaCO_3$/L | 118,1 ± 4,5 |

#### *1.2.1.1 Le phosphore*

En 2007, la moyenne du phosphore total retrouvé dans 7 échantillons de sédiments au lac Saint-Augustin était de 1209 mg P/kg de sédiments secs (Brin, 2007). En outre, une autre étude fait plutôt mention d'une concentration moyenne de 892 mg P/kg, cette fois sur 20 sites d'échantillonnage (Consortium DDM — ProFaune, 2005). Le tableau 5 compare la concentration moyenne et les intervalles de concentrations en phosphore total retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin avec les seuils d'effets mineurs (SEM) et néfastes (SEN) sur la communauté benthique définis par le Centre Saint-Laurent (1993) (Brin, 2007). À propos, les seuils (SEM et SEN) définis au tableau 5 pour le phosphore total dans les sédiments représentent des critères de qualité pour lesquels un dépassement entraîne des conséquences négatives pour la communauté benthique. Selon le tableau 5, la concentration moyenne et les intervalles de concentration retrouvés en phosphore total dans les sédiments du lac Saint-Augustin dépassent de beaucoup le seuil d'effets mineurs sans toutefois atteindre le seuil d'effets majeurs. Les sédiments du lac Saint-Augustin sont donc fortement contaminés en phosphore qui représente ainsi un contaminant prioritaire à traiter.

**Tableau 5: Phosphore total dans les sédiments du lac Saint-Augustin (Tiré de Brin, 2007)**

| Phosphore total retrouvé dans les sédiments du lac Saint-Augustin | | SEM | SEN |
|---|---|---|---|
| mg/kg | | mg/kg | mg/kg |
| Moyenne | Intervalle | | |
| 1209 | 1100 – 1300 | 600 | 2000 |

Le phosphore est retrouvé selon différentes formes chimiques au sein d'une matrice de sédiments. Il peut être associé à des oxydes/hydroxydes de fer, au carbonate de calcium ou

à la matière organique (Rydin, 2000). Au lac Saint-Augustin, le phosphore présent dans les sédiments possède la spéciation chimique illustrée à la figure 5 (Brin, 2007). Sur cette figure, les 200 mg P/kg de sédiments secs associés à la matière organique sont potentiellement disponibles sous la forme d'orthophosphates ($PO_4^{3-}$, $HPO_4^{2-}$ et $H_2PO_4^-$). Les orthophosphates sont reconnus pour leur haut potentiel de dissolution dans l'eau et sont responsables de l'eutrophisation du lac Saint-Augustin (Bourget et *al.*, 2011 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2002 ; Fetter, 1999).

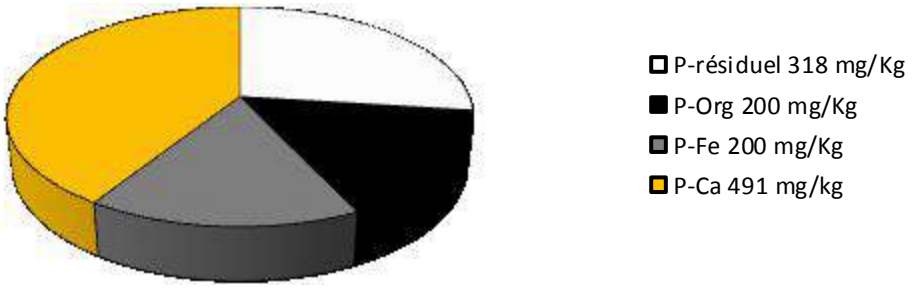


**Figure 5: Spéciation chimique du phosphore dans les sédiments du lac Saint-Augustin**

Au total et selon ProFaune, la masse totale du phosphore retrouvé dans le lac est estimée à 54,1 tonnes et l'apport provenant du relargage en été est évalué à 357,8 mg/m² (245 kg P/été). Cet apport interne provient des sédiments contaminés non consolidés dont le volume total est estimé à 736 379 m³ et dont la teneur en eau avoisine les 90 % (Consortium DDM — ProFaune, 2005). Les principaux apports en phosphore total pour le cas du lac Saint-Augustin proviennent donc des sédiments retrouvés au fond du lac et des eaux souterraines qui alimentent le lac (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012).

De plus, les essais de diffusion réalisés dans le volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin ont permis d'identifier de manière plus précise la couche de sédiment responsable du relargage en phosphore dans la colonne d'eau. Il ressort de ces tests que les 10 premiers centimètres de la couche récente, déposée après 1960, montrent un potentiel de relargage en phosphore nettement plus élevé que les couches plus profondes et plus anciennes. Les sédiments récents sont donc responsables du relargage du phosphore à contrôler dans la colonne d'eau au lac Saint-Augustin (Constantin et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2010).

### *1.2.1.2 Les métaux lourds*

Les sédiments du lac Saint-Augustin sont aussi fortement contaminés en métaux lourds. Le tableau 6 présente une compilation des concentrations moyennes en métaux lourds obtenues dans les études de Landry (1993), Consortium DDM – ProFaune (2005) et Brin (2007). Le nombre de sites où il y a eu échantillonnage et caractérisation des sédiments en métaux lourds pour chaque étude est représenté par le paramètre « n » et les écart-types sont indiqués lorsque disponibles. Essentiellement, les concentrations en métaux lourds ont considérablement augmenté entre 1993 et 2005. Il en ressort également que le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc présentent des concentrations en moyenne supérieures aux seuils d'effets mineurs (SEM) définis pour ces métaux et représentent donc des contaminants prioritaires à traiter. Les autres métaux affichent un niveau de contamination près des seuils et doivent être surveillés afin d'éviter une aggravation de la situation actuellement observée (Brin, 2007 ; Dominguez, 2004 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003 ; Brin et Dominguez, 2002).

**Tableau 6: Concentrations moyennes et écart-types des principaux métaux lourds retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin****

| Métaux lourds | SEM<br>mg/kg | Concentrations (Landry, 1993)<br>mg/kg, n=6 | Concentrations métaux extractibles (2001 – (Brin, 2007))<br>mg/kg, n=42 | Teneur en métaux (Consortium DDM – ProFaune, 2005)<br>mg/kg, n=42 | Concentrations disponibles (Brin, 2007)<br>mg/kg |
|---|---|---|---|---|---|
| **Arsenic** | 7 | 3,2 ± 0,8 | 6,9 ± 1,1 | — | — |
| **Cadmium** | 0,9 | 0,6 ± 0,1 | 2,3 ± 0,7 | **2,4** | **1,4** |
| **Chrome** | 55 | 22,7 ± 4,4 | 25 ± 7,9 | 30,2 | 12,4 |
| **Cuivre** | 28 | 18,4 ± 4,0 | 39 ± 11,4 | **41** | 20,4 |
| **Mercure** | 0,2 | 0,05 ± 0,01 | 0,13 ± 0,02 | — | — |
| **Nickel** | 35 | 28,8 ± 5,3 | 39 ± 11,7 | **43,5** | 16,1 |
| **Plomb** | 42 | 24,3 ± 4,5 | 75 ± 29,5 | **81,4** | **71,5** |
| **Zinc** | 150 | 121,3 ± 21,2 | 272 ± 85,3 | **298,0** | **216,5** |

** Les valeurs soulignées et en gras sont supérieures aux SEM définis pour chaque métal.

Dans le tableau 6, les quatre métaux lourds considérés comme des contaminants prioritaires sont le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc puisqu'ils affichent des concentrations en moyenne supérieures aux SEM respectifs définis pour ces métaux. Une extraction séquentielle sélective réalisée sur les sédiments du lac Saint-Augustin pour ces quatre contaminants prioritaires a révélé une forte affinité de ces métaux pour les carbonates, les

oxydes/hydroxydes et la matière organique. Seul le cadmium a montré spéciation un peu plus forte pour les métaux échangeables (Dominguez, 2004 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003).

En outre, les concentrations moyennes retrouvées pour l'aluminium et le fer sur 20 échantillons sont respectivement de 19 119 mg Al/kg et 29 355 mg Fe/kg (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les teneurs naturelles retrouvées dans les sédiments des lacs d'eau douce du Saint-Laurent (Environnement Canada et MDDEP, 2007).

### 1.2.2 Les eaux de surface

Le lac Saint-Augustin est principalement alimenté par les eaux souterraines de son bassin versant qui doivent traverser une couche de sédiments contaminés au fond du lac avant de rejoindre la colonne d'eau. Le niveau de contamination des eaux de surface est une caractéristique essentielle à connaître pour l'élaboration de solutions de restauration conséquentes et adaptées. Le tableau 7 montre les valeurs moyennes de pH, de conductivité et de turbidité des eaux de surface du lac Saint-Augustin en 2000 et 2001 (Parant, 2007).

**Tableau 7: pH, conductivité et turbidité des eaux du lac Saint-Augustin**

| Paramètres | Unité | Période | Valeurs moyennes |
|---|---|---|---|
| **pH** | | été 2000<br>printemps - été 2001 | 7,6 – 8<br>7,5 – 8,8 |
| **Conductivité** | µS/cm | été 2000<br>printemps - été 2001 | 700<br>795 |
| **Turbidité** | NTU | printemps 2001<br>été 2001 | 2<br>23 |

Dans le tableau 7, l'augmentation du pH en été est liée à l'accroissement de l'activité biologique qui consomme l'oxygène disponible pour rejeter du $CO_2$, ce qui déplace l'équilibre acido-basique vers les pH basiques (Sigg et *al.*, 2006). L'augmentation de la turbidité au printemps et à l'été est également liée à l'augmentation de la productivité primaire qui a pour conséquence directe de diminuer la transparence dans la colonne d'eau (Parant, 2007). Les valeurs de conductivité élevées peuvent être expliquées par l'apport important en sels de déglaçage provenant de l'autoroute Félix-Leclerc. En outre, les sels contribuent aussi à faire augmenter le pH (Galvez-Cloutier et *al.*, 2006).

#### *1.2.2.1 Le phosphore*

Le phosphore est un facteur déterminant dans la classification trophique d'un lac et est fortement lié à d'autres indicateurs d'eutrophisation tels que la concentration en chlorophylle-α et la transparence Secchi. À propos, les eaux typiques d'un lac eutrophe affichent une concentration élevée en phosphore, ce qui a pour principal effet de stimuler la croissance algale. L'augmentation de la biomasse végétale qui en découle se traduit alors par une augmentation de la concentration en chlorophylle-α et par une diminution de la transparence de l'eau (Galvez-Cloutier and Sanchez, 2007).

Bien qu'il existe plusieurs variétés de pigments photosynthétiques tels que la chlorophylle-α, la chlorophylle-β, le caroténoïde, etc. dans le règne végétal, l'intérêt de la chlorophylle-α comme indicateur d'eutrophisation d'un lac réside dans le fait qu'elle est le principal pigment retrouvé chez les eucaryotes et les cyanobactéries. En d'autres mots, puisque seule la chlorophylle-α peut déclencher les réactions photochimiques essentielles à la photosynthèse, elle est retrouvée dans la presque totalité des végétaux, y compris les algues (Campbell et Reece, 2004 ; Prescott et *al.*, 2003 ; Ryding and Rast, 1994).

Par ailleurs, la transparence Secchi est un indicateur simple, efficace et rapide pour avoir une idée du niveau trophique d'un plan d'eau puisque l'augmentation de la biomasse végétale découlant de l'abondance en phosphore entraîne une diminution de la transparence. La transparence Secchi correspond à la mesure de la profondeur à partir de laquelle un disque noir et blanc disparait dans la colonne d'eau (Ryding and Rast, 1994). Il est préférable de réaliser ce test à l'ombre afin de diminuer l'impact de la luminosité sur la justesse de la mesure (Bourget et *al.*, 2011). La figure 6 montre une photo d'un disque Secchi utilisé pour la mesure de la transparence d'un lac.

**Figure 6: Disque Secchi**

Le tableau 8 présente les valeurs des paramètres indicateurs d'eutrophisation décrits ci-dessus pour les eaux du lac Saint-Augustin. On y constate une augmentation significative de la concentration en phosphore dissous dans la colonne d'eau depuis les 30 dernières années, indiquant une accélération du phénomène d'eutrophisation. L'augmentation de la chlorophylle-α entre le printemps et l'été 2001 témoigne d'une augmentation significative de la biomasse végétale au cours de la période estivale (Parant, 2007). Le carbone organique dissous (COD) a été ajouté à ce tableau puisque les acides humiques et fulviques donnent une couleur à l'eau et peuvent affecter la valeur de transparence Secchi sans pour autant rendre l'eutrophisation responsable de ce phénomène (Crittenden et *al.,* 2005).

**Tableau 8: Indicateurs d'eutrophisation pour les eaux du lac Saint-Augustin (Tiré de Parant, 2007)**

| Paramètres | Unités | Année de la mesure | Valeur | Seuil eutrophe (MDDEP, 2011a) |
|---|---|---|---|---|
| **Phosphore** | µg/L | été 1977<br>été 2003 | 30<br>77,6 | 30 – 100 |
| **Chlorophylle-α** | µg/L | printemps 2001<br>été 2001 | 6,7<br>62,4 | 8 – 25 |
| **Transparence Secchi** | m | 2004 | 1,5 | 2,5 – 1 |
| **COD** | mg/L | | 5,7 | N-A |

À la lumière des critères de classification des niveaux trophiques établis par le MDDEP et repris au tableau 8, le lac Saint-Augustin est au stade eutrophe selon tous les indicateurs présentés ci-dessus (MDDEP, 2011a).

#### *1.2.2.2 Les métaux lourds*

Les métaux lourds sont reconnus pour le risque qu'ils posent sur la santé humaine et l'environnement. La caractérisation des sédiments du lac Saint-Augustin a permis d'identifier quatre métaux lourds prioritaires qui affichent des concentrations qui dépassent en moyenne le seuil d'effet mineur respectif pour chacun de ces métaux : le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc (Dominguez, 2004). Comme le lac Saint-Augustin est principalement alimenté par les eaux souterraines de son bassin versant (Pérez-Arzola et *al.*, 2006 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2006) et qu'une désorption des métaux lourds peut survenir à l'interface eau-sédiment, ceux-ci ont été caractérisés dans la colonne d'eau. Les

résultats de cette caractérisation pour les eaux du lac Saint-Augustin sont montrés au tableau 9. On y remarque l'absence apparente du relargage des métaux lourds provenant des sédiments puisque tous les résultats obtenus présentent des valeurs en-dessous des limites de détection (Dominguez, 2004). L'absence de métaux dans la colonne d'eau trouve une explication avec le fait que les métaux sont plus solubles à pH acide (Yong and Galvez-Cloutier, 1993) et que les eaux du lac Saint-Augustin affichent un pH basique typique des lacs eutrophes (Brin, 2007). Les conditions physico-chimiques qui favorisent le relargage des métaux lourds seront reprises plus en détails dans le chapitre 2.

**Tableau 9: Métaux lourds dans les eaux du lac Saint-Augustin**

| Paramètres | Unités | Eau de surface | Limite de détection |
|---|---|---|---|
| Cd | mg/L | < 0,03 | 0,03 |
| Cu | mg/L | < 0,03 | 0,03 |
| Pb | mg/L | < 0,5 | 0,5 |
| Zn | mg/L | < 0,03 | 0,03 |

### 1.2.3 Initiatives réalisées et plan directeur

La première action à entreprendre pour procéder à la restauration d'un plan d'eau est d'éradiquer toutes les sources externes, ponctuelles et diffuses identifiées et responsables de la contamination observée (Nadeau and Skaggs, 2007 ; Heathcote, 1998). Pour faire face à l'ensemble des problématiques identifiées au lac Saint-Augustin, le comité de bassin versant du lac Saint-Augustin a mandaté EXXEP Environnement de leur fournir un plan directeur ciblant les actions prioritaires à entreprendre pour limiter les apports externes en phosphore et métaux lourds. À ce sujet, le plan directeur réalisé pour le lac Saint-Augustin devait répondre aux objectifs suivants (EXXEP, 2003) :

- prévenir et contrôler à la source la pollution ponctuelle pour protéger les écosystèmes aquatiques et terrestres du bassin versant ;
- prévenir et contrôler à la source la pollution diffuse pour protéger les écosystèmes aquatiques et terrestres du bassin versant ;
- assurer un suivi de la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant ;
- assurer la mise en valeur du territoire ;

- protéger à long terme de l'environnement par la mise en place d'un programme d'informations

L'annexe A présente un sommaire des actions ciblées par ce plan directeur et qui devaient être complétées entre 2003 et 2005.

## 1.3 Le projet de maîtrise

Ce projet de maîtrise s'inscrit à la suite des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin décrits sommairement au tout début de ce chapitre. Dans ces volets, différents procédés de gestion des sédiments contaminés ont été testés à l'échelle pilote à l'aide d'essais en enclos sur une plate-forme flottante. Les procédés testés dans le volet 1 incluent l'inactivation du phosphore particulaire et des colloïdes par coagulation à l'alun ainsi que le confinement des sédiments contaminés à l'aide d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable. Les procédés testés dans le volet 2 consistent en l'enlèvement des sédiments contaminés à travers deux méthodes de dragage : le dragage mécanique et le dragage hydraulique à succion. Les résultats issus de ces deux volets ont notamment permis de quantifier les performances respectives de chacun de ces procédés au lac Saint-Augustin en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble qui cause l'eutrophisation du lac.

Fort des résultats obtenus dans les volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin, des scénarios pour la gestion des sédiments contaminés peuvent être construits à l'échelle du lac sur les zones où la contamination retrouvée dans les sédiments est plus importante. Ces zones doivent d'abord être définies et les scénarios à construire doivent incorporer les procédés testés à l'échelle pilote puisque les niveaux de performance de ces procédés sont connus spécifiquement pour le cas du lac Saint-Augustin. Les résultats obtenus dans les volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin de même que les résultats des études et projets antérieurs peuvent être adaptés afin de développer les données techniques, économiques, environnementales et sociales pour chacun des scénarios proposés dans le cadre de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin. Les scénarios les plus performants peuvent ensuite être identifiés à travers l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision spécialement sélectionnées. La figure 7 illustre

le positionnement de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin par rapport à l'ensemble des études et projets antérieurs réalisés à ce jour. Il s'agit donc d'un projet de maîtrise intégrateur et complémentaire à l'ensemble des études et initiatives réalisées à jour au lac Saint-Augustin.

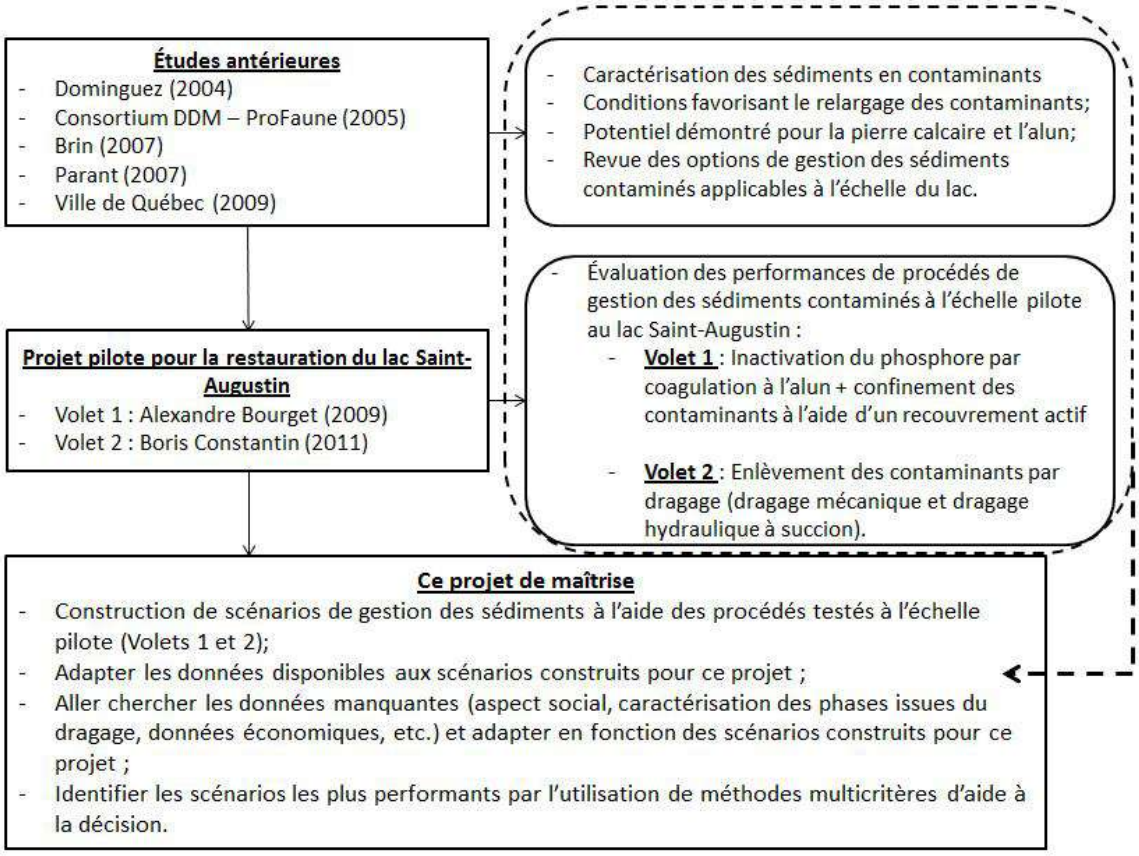


**Figure 7 : Position de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin par rapport aux projets réalisés à ce jour**

### 1.3.1 Hypothèses, but et objectifs

Les hypothèses posées pour la réalisation de ce projet de maîtrise s'énumèrent comme suit :

- les principaux apports externes en phosphore et métaux lourds sont déjà contrôlés ou en voie de l'être dans un proche avenir (Saint-Augustin-de-Desmaures, 2011) ;
- les résultats obtenus dans les volets 1 et 2 peuvent être extrapolés à l'échelle du lac pour la construction des scénarios pour la gestion des sédiments contaminés ;

- les méthodes multicritères d'aide à la décision sont performantes et peuvent être utilisées pour les décisions à caractère environnemental réunissant des objectifs de nature variée ;
- le statu quo n'est pas une option envisageable.

Le but poursuivi par ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin s'énonce comme suit :

- proposer une solution pour la meilleure gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin.

Bien que le but ultime soit la restauration du plan d'eau et de ses usages, les objectifs spécifiques à ce mémoire s'énumèrent comme suit :

1- construire différents scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés sur les zones les plus contaminées du lac Saint-Augustin à partir des procédés testés à l'échelle pilote (volets 1 et 2);
2- récolter les données techniques, économiques, environnementales et sociales et les adapter en fonction des scénarios/sous-scénarios bâtis en 1 ;
3- évaluer la performance des scénarios/sous-scénarios selon des critères et sous-critères bien définis au respect d'un barème d'évaluation spécialement construit en fonction des données économiques, techniques, environnementales et sociales ;
4- utiliser deux méthodes multicritères d'aide à la décision afin d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s) ;
5- mesurer la robustesse des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin et identifier les critères qui contrôlent le choix de la meilleure option en réalisant une analyse de sensibilité ;
6- comparer les résultats obtenus selon les deux méthodes multicritères d'aide à la décision ;
7- faire des recommandations sur la stratégie de gestion des sédiments contaminés à adopter dans le cas du lac Saint-Augustin.

## 1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en 6 chapitres. Le chapitre 1 présente un sommaire de l'ensemble des travaux réalisés au lac Saint-Augustin de même que les principales caractéristiques du lac, sa position au sein de son bassin versant, l'historique de la contamination et une description exhaustive des problématiques retrouvées. Une revue détaillée des niveaux de contamination retrouvés dans les sédiments et dans l'eau du lac est également effectuée. Les hypothèses, le but poursuivi et les objectifs spécifiques à ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin y sont également définis.

Le chapitre 2 présente l'état des connaissances des domaines connexes et essentiels à la réalisation de ce projet de maîtrise. Les connaissances entourant l'eutrophisation et les niveaux trophiques permettant de déterminer l'état de santé d'un lac débutent le chapitre. Les différents facteurs physico-chimiques d'influence sur le relargage du phosphore et des métaux lourds contenus dans les sédiments sont ensuite présentés. Un parallèle avec la situation retrouvée au lac Saint-Augustin est également donné pour chaque classe de contaminants. Une revue des stratégies de gestion des sédiments contaminés et applicables au cas du lac Saint-Augustin est également effectuée. Enfin, les méthodes multicritères d'aide à la décision et les étapes préliminaires à leur utilisation sont expliquées en détails à la fin du chapitre. Deux méthodes multicritères d'aide à la décision sont enfin sélectionnées comme outils pour l'identification d'une solution qui offre le meilleur compromis parmi des critères et des sous-critères bien définis pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

Le chapitre 3 présente en détails la méthodologie suivie et préalable à l'utilisation des deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées pour ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin. D'abord, la méthode suivie pour la détermination des zones les plus contaminées au lac Saint-Augustin est présentée. Les scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés sont ensuite construits à partir des procédés testés dans le cadre des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin sur les zones les plus contaminées du lac. Les critères et sous-critères à prendre en considération dans la prise de décision sont ensuite définis en détails et commentés à l'égard de chaque procédé

utilisé pour la construction des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés. L'arbre hiérarchique est enfin développé et les différentes situations à réaliser à travers une analyse de sensibilité sur les critères sont précisées et justifiées.

Le chapitre 4 présente d'abord les caractéristiques techniques et économiques de chacun des scénarios/sous-scénarios proposés au chapitre 3 pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Un barème d'évaluation permettant d'évaluer chacun des scénarios/sous-scénarios à l'égard des sous-critères économiques, techniques, environnementaux et sociaux est ensuite construit. Chaque scénario/sous-scénario est évalué à l'égard de ce barème et les deux méthodes multicritères d'aide à la décision retenues afin d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s) de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin sont programmées dans Excel et utilisées. Les résultats sont ensuite présentés pour chaque situation de l'analyse de sensibilité et pour chacune des deux méthodes multicritères d'aide à la décision. Les scénarios/sous-scénarios sont hiérarchisés selon leurs scores de performance et une comparaison est effectuée entre les sorties des deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées.

Enfin, le chapitre 5 porte sur la discussion et la portée des résultats obtenus à l'aide des deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées pour ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin. Les scénarios les plus performants et les moins performants sont identifiés et regroupés en sous-groupes. La méthode suivie pour l'obtention des résultats du chapitre 4 est commentée et plusieurs commentaires connexes sont amenés à la discussion afin d'identifier diverses ouvertures, recommandations et perspectives possibles.

Le chapitre 6 conclut ce mémoire et présente les principales conclusions et recommandations à la lumière des principaux résultats obtenus. Un retour sur les résultats est effectué pour chacune des méthodes multicritères d'aide à la décision utilisées afin d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin parmi les scénarios proposés pour ce projet de maîtrise. Des recommandations sont effectuées et d'éventuelles ouvertures et perspectives sont discutées.

# Chapitre 2 État des connaissances

## 2.1 L'eutrophisation

L'eutrophisation des lacs et réservoirs est un processus naturel d'enrichissement en nutriments essentiels à la croissance des plantes qui se traduit par le vieillissement des plans d'eau. D'ailleurs, le terme eutrophe provient du langage grec et signifie «bien nourri» (Campbell et Reece, 2004). Toutefois, le stress anthropogénique que subit un bassin versant peut considérablement accélérer le processus d'eutrophisation des lacs et réservoirs. Les activités humaines telles que la déforestation, l'exploitation de zones agricoles, l'utilisation de fertilisants, l'imperméabilisation des surfaces et le développement urbain sont des exemples de facteurs anthropogéniques qui contribuent à l'accélération de l'eutrophisation. Dans le monde, l'eutrophisation est le problème le plus répandu lorsqu'il est question de santé précaire des lacs et réservoirs (Ryding and Rast, 1994). L'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) en donne la définition suivante : « enrichissement des eaux en matières nutritives qui entraîne une série de changements symptomatiques tels que l'accroissement de la production d'algues et de macrophytes, la dégradation de la qualité de l'eau et autres changements symptomatiques considérés comme indésirables et néfastes aux divers usages de l'eau[1] ».

Le principal élément responsable de l'eutrophisation des plans d'eau est le phosphore qui est souvent l'élément limitant dans la croissance algale des écosystèmes d'eaux douces. L'azote est également un nutriment essentiel à la croissance des plantes mais n'est généralement pas limitant. Dans le cas des lacs eutrophes, le phosphore peut provenir de sources externes telles que le ruissellement urbain et agricole, les mauvais raccordements au réseau d'égouts, les fosses septiques non conformes, mais peut également provenir de sources internes comme les sédiments (Sondergaard et *al.*, 2003 ; IETC, 1999 ; Ryding and Rast, 1994; National Academy of Sciences, 1969). Par ailleurs, l'augmentation des concentrations en phosphore dans les lacs et réservoirs peut être la conséquence d'une utilisation intensive de la ressource qui entraîne une diminution suffisante du niveau d'eau

[1] RYDING S.O and RAST W. (1994), *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs*, Masson, Paris, 194 pages., p.1

pour causer une augmentation des concentrations. C'est notamment le cas pour le lac Albano (Italie centrale) et pour plusieurs lacs d'Europe de l'Est, où l'eau est principalement utilisée pour l'irrigation, l'hydroélectricité et la production d'eau potable (Ellwood et *al.*, 2009 ; National Academy of Science, 1969).

Les symptômes observés dans un lac eutrophe incluent (IETC, 1999 ; Ryding and Rast, 1994) :

- augmentation de la productivité primaire et de la biomasse ;
- augmentation de la fréquence des floraisons d'algues ;
- diminution de la profondeur en raison de l'accumulation de la matière organique qui sédimente au fond du plan d'eau ;
- déficit en oxygène dissous dans la couche profonde issu de la décomposition de la matière organique par les bactéries et de la respiration par les plantes ;
- diminution et modification de la biodiversité végétale et animale ;
- diminution de la transparence de l'eau ;
- diminution de la qualité de l'eau (goûts et odeurs) et restriction des usages ;
- présence possible de cyanobactéries.

Dans un plan d'eau, l'eutrophisation apparaît graduellement selon quatre étapes distinctes. La première étape comprend l'enrichissement graduel du plan d'eau en nutriments (azote et phosphore). La biodiversité du système n'est pas immédiatement affectée négativement par cet apport nutritif supplémentaire et en profite. La seconde étape est caractérisée par un accroissement du phytoplancton qui meurt, sédimente et se décompose au fond du lac. Certaines espèces commencent alors à disparaitre et la biodiversité de l'écosystème entre dans une période de diminution. L'étape 3 montre une abondance des proliférations algales et des fleurs d'eau qui causent une diminution de la transparence de l'eau. Les organismes qui meurent sédimentent au fond du lac et sont décomposés par des bactéries qui consomment de manière intensive l'oxygène dissous de l'hypolimnion. À la dernière étape et lorsque tout l'oxygène dissous a été consommé, les bactéries aérobies font place aux bactéries anaérobies qui libèrent du méthane et de l'ammoniac dans leur processus de dégradation de la matière organique (Parant, 2007).

La figure 8 montre très bien le visage et les symptômes caractéristiques de l'eutrophisation d'un plan d'eau malade. Sur ces photos, l'augmentation de la productivité primaire est causée par l'abondance en phosphore dans l'eau, ce qui donne la couleur verte retrouvée en surface et réduit la transparence. L'absence de lumière dans les eaux profondes inhibe la photosynthèse et la décomposition de la matière organique par les bactéries consomme l'oxygène dissous, ce qui affecte la biodiversité du plan d'eau et limite ses usages.

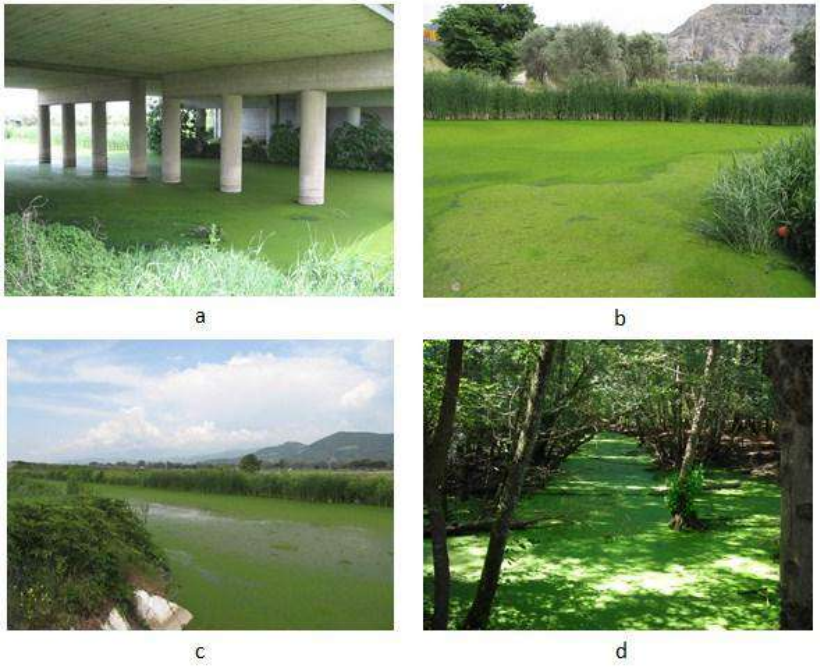


**Figure 8: Eaux eutrophes des canaux du bassin versant du fleuve Serchio, Provincia di Lucca, Toscane, Italie (Photos a, b et c : Jean-Philippe Laliberté – Photo d : Paolo Basile[2])**

### 2.1.1 Les niveaux trophiques

Les plans d'eau se classent selon différents niveaux trophiques qui illustrent l'intensité apparente du phénomène d'eutrophisation. Plusieurs paramètres interreliés sont utilisés dans la classification, notamment les concentrations en phosphore dissous et en chlorophylle-α ainsi que la transparence de l'eau. Rappelons que la chlorophylle-α est le principal pigment photosynthétique retrouvé chez les eucaryotes et les cyanobactéries (Campbell et Reece, 2004 ; Prescott et *al.*, 2003). Comme le phosphore est généralement l'élément limitant dans les écosystèmes d'eau douce, une augmentation de sa concentration

[2] Basile Paolo, Candidat Ph.D., *Scuola Superiore Sant'Anna,* Pisa, Italie, photos prises en août 2009

entraîne inévitablement une augmentation de la croissance algale et, par extension, des concentrations en chlorophylle-α. Inversement, l'augmentation de la biomasse algale dans la colonne d'eau entraîne une diminution de la transparence (Galvez-Cloutier and Sanchez, 2007). Au Québec, la classification des niveaux trophiques se fait selon ces indicateurs d'eutrophisation dont les valeurs seuils sont représentées à la figure 9 (MDDEP, 2011a).

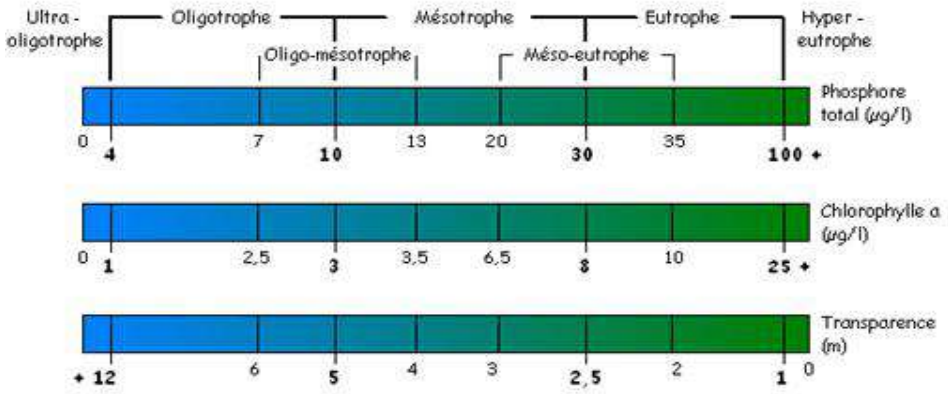


**Figure 9: Classification des niveaux trophiques des lacs et réservoirs au Québec (MDDEP, 2011a)**

Une problématique caractéristique des lacs eutrophes est la prolifération de cyanobactéries qui profitent de l'abondance en phosphore pour se développer. Certaines espèces possèdent la capacité de migrer au sein de la colonne d'eau et peuvent fixer l'azote atmosphérique lorsque ce nutriment devient limitant dans l'eau. La prolifération de ces algues est caractérisée par la présence de fleurs d'eau à la surface des lacs et réservoirs affectés. Un intérêt grandissant est porté aux cyanobactéries puisqu'elles libèrent des cyanotoxines qui sont néfastes pour la santé humaine et l'environnement (Bouchard-Valentine, 2004 ; Prescott et *al.*, 2003 ; IETC, 1999 ; Ryding and Rast, 1994).

À l'inverse d'un lac eutrophe, un lac oligotrophe est caractérisé par une faible concentration en nutriments, une grande transparence de l'eau, une grande biodiversité végétale et animale, une faible productivité primaire et des eaux de bonne qualité pour lesquelles il n'y a aucune restriction des usages (Ryding and Rast, 1994). Le niveau trophique mésotrophe caractérise les lacs se situant entre les niveaux oligotrophe et eutrophe. La figure 10 montre un schéma comparatif de l'évolution du niveau trophique d'un lac ou d'un réservoir dans le temps selon qu'il se trouve dans un milieu naturel ou dans un milieu modifié par l'homme (MDDEP, 2011a).

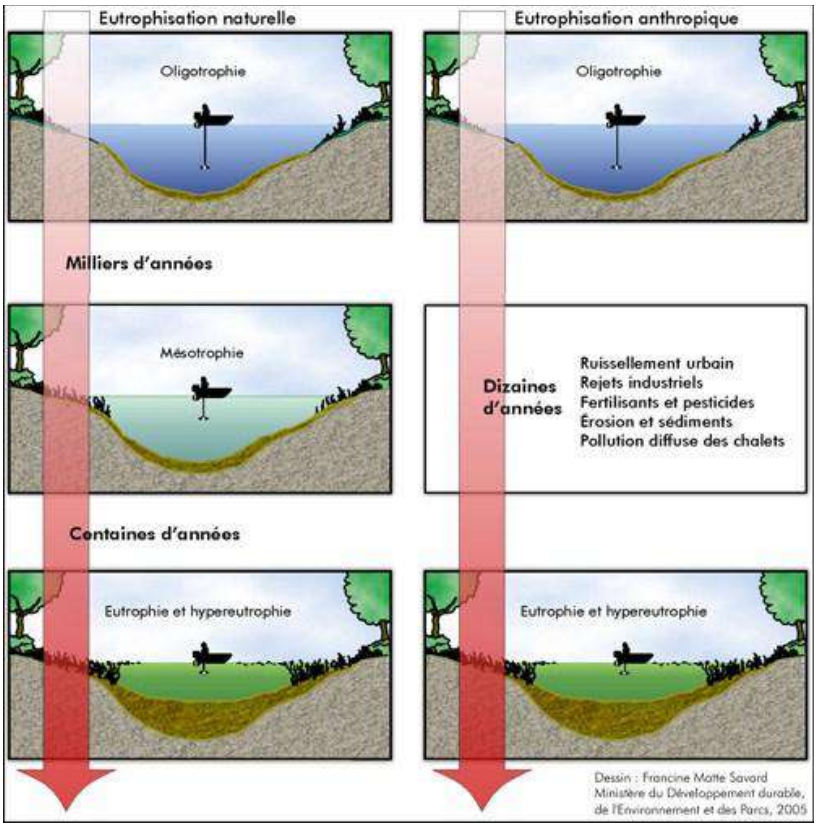


**Figure 10: Comparaison entre l'eutrophisation naturelle et l'eutrophisation anthropique (MDDEP, 2011a)**

Le tableau 10 reprend les niveaux trophiques précédemment décrits et les présente en perspective avec les symptômes observés plus l'eutrophisation s'installe dans les lacs et réservoirs (Galvez-Cloutier et *al.*, 2002). Compte tenu de la situation actuellement observée au lac Saint-Augustin et présentée dans la section 1.2.2 pour les eaux de surface, le lac peut être classifié eutrophe, voire même hyper-eutrophe.

**Tableau 10: Symptômes de l'eutrophisation et niveaux trophiques (Tiré de Galvez-Cloutier et *al.*, 2002)**

| Catégorie | Ultra-oligotrophe | Oligotrophe | Mésotrophe | Eutrophe | Hyper-eutrophe |
|---|---|---|---|---|---|
| **Biomasse** | Faible | Faible | Moyenne | Forte | Très forte |
| **Algues vertes et cyanobactéries** | Faible | Faible | Variable | Forte | Très forte |
| **Macrophytes** | Faible — nul | Faible | Variable | Faible à forte | Faible |
| **Productivité primaire** | Très faible | Faible | Moyenne | Forte | Forte |
| **Oxygénation épilimnion** | Normale | Normale | Variable | Sursaturation | Très variable |
| **Oxygénation hypolimnion** | Normale | Normale | | Sous-saturation | Très variable |

Nombreux sont les facteurs qui influencent le degré d'eutrophisation d'un lac. Parmi les facteurs naturels, on retrouve le climat, l'hydrologie, la géologie et la topographie du bassin versant. La durée d'ensoleillement, les températures de l'air et de l'eau ainsi que la quantité des précipitations ont une influence significative sur l'eutrophisation. Parmi les facteurs humains, on retrouve les sources ponctuelles et diffuses de même que l'occupation changeante du sol. D'autres facteurs tels que la morphologie du plan d'eau, les sources endogènes de nutriments, le taux de renouvellement des eaux, l'intensité de la lumière incidente au lac et le contrôle biologique ont également une influence sur l'intensité du phénomène d'eutrophisation des plans d'eau (Ryding and Rast, 1994).

### 2.1.2 Le phosphore

Le phosphore est un élément essentiel à la croissance des végétaux tout en étant généralement limitant dans les écosystèmes d'eaux douces. Introduit par Justus Leibig en 1840, le concept de facteur limitant est né de l'observation voulant que le rendement des cultures agricoles soit affecté par un manque de substances essentielles à la croissance des plantes. L'équation suivante décrit la photosynthèse des plantes qui utilisent essentiellement le $CO_2$ de l'air pour le transformer en $O_2$.

$$CO_2 + NO_3^- + PO_4^{2-} + H_2O + H^+ + oligoéléments + lumière \overset{photosynthèse}{\underset{respiration}{\Longleftrightarrow}} Cytoplasme + O_2$$

En présumant que le taux d'absorption et d'utilisation des nutriments essentiels à la réalisation de la photosynthèse respecte la proportion de ces éléments à l'intérieur de la cellule végétale, on obtient un ratio de 106C : 16N : 1P. Le phosphore est ici limitant puisqu'il s'agit de l'élément essentiel retrouvé en plus faible proportion pour la synthèse d'une cellule végétale. L'abondance du phosphore soluble dans les plans d'eau eutrophes permet donc une croissance importante des végétaux et représente donc l'élément responsable des symptômes que l'on reconnait à l'eutrophisation (Ryding and Rast, 1994).

Dans les eaux naturelles, le phosphore soluble (orthophosphates) correspond aux produits de dissociation de l'acide phosphorique ($H_3PO_4$) : $H_2PO_4^-$, $HPO_4^{2-}$ et $PO_4^{3-}$ et est biodisponible pour une utilisation par les plantes (Bourget et *al.*, 2011 ; Brin, 2007 ; Fetter,

1999). Une solution à l'eutrophisation est donc de contrôler les apports externes et internes en phosphore soluble afin de progressivement diminuer les concentrations retrouvées dans l'eau et ainsi inhiber la croissance algale (IETC, 1999 ; Ryding and Rast, 1994). Les autres formes principales retrouvées incluent les polyphosphates et les organophosphates et ne sont pas directement assimilables par les plantes aquatiques (Parant, 2007).

La figure 11 illustre le cycle du phosphore dans un système d'eau douce. Le phosphore entre dans un système lacustre par des processus érosifs, de déposition atmosphérique ou de ruissellement urbain/agricole et se solubilise dans l'eau ou sédimente au fond du lac pour être disponible plus tard par relargage. Deux issues sont possibles une fois que le phosphore entre dans le système d'eau douce : accumulation dans les tissus des phytoplanctons ou accumulation dans les sédiments (Warwick, 2010). La remise en solution du phosphore contenu dans les sédiments est étroitement liée aux conditions physico-chimiques retrouvées à l'interface eau-sédiment (Brin, 2007 ; Sondergaard et *al.*, 2003).

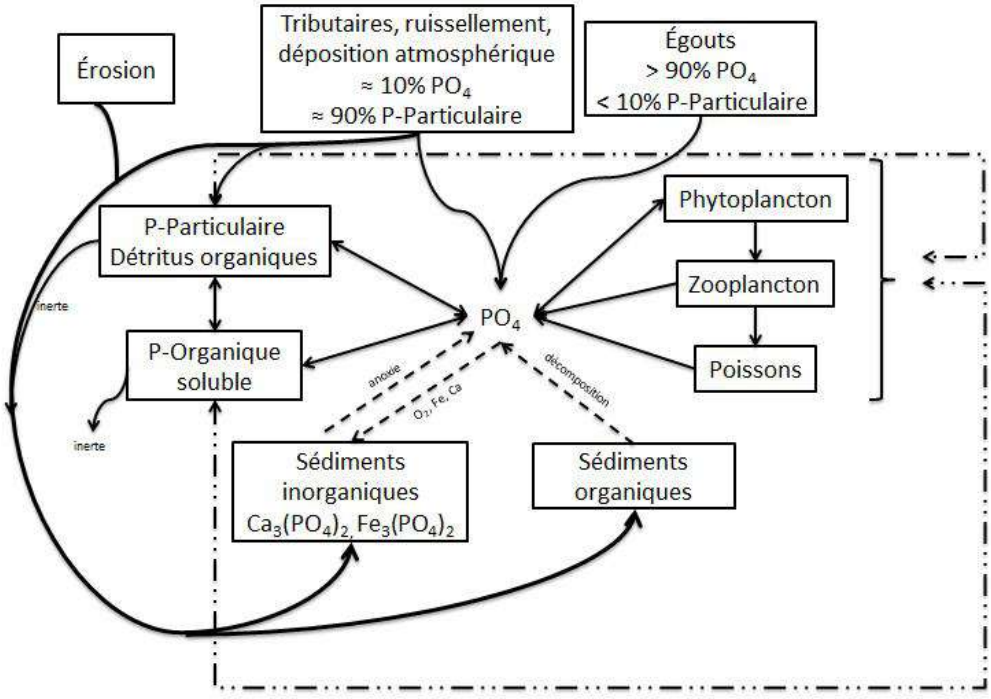


**Figure 11: Cycle du phosphore dans un lac (Adapté de Warwick, 2010)**

Les principaux mécanismes de transfert du phosphore de l'eau vers les sédiments sont les échanges ioniques, l'adsorption et la précipitation. Inversement, les processus de réintroduction du phosphore des sédiments dans la colonne d'eau incluent l'advection, les

échanges ioniques, la diffusion moléculaire et les changements biologiques (Lee-Hyung et *al.*, 2003).

Les sédiments jouent un rôle capital dans le fonctionnement d'un écosystème lacustre en fournissant un habitat riche et propice aux diatomées, daphnies et gastéropodes (Soumis-Dugas et *al.*, 2009 ; Brin, 2007 ; Ryding and Rast, 1994). Ces organismes se nourrissent des particules en suspension et des éléments nutritifs retrouvés dans le milieu naturel. Les contaminants peuvent être ingérés par ces organismes et s'accumuler dans la chaîne alimentaire (Mulligan et *al.*, 2001).

Au lac Saint-Augustin, une importante population d'escargots *Cipangopaludina chinensis* tapisse le fond du lac et contribuent à l'eutrophisation à travers leurs activités de broutage qui génèrent une remise en suspension des sédiments dans certaines zones fortement contaminées (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012). Ces escargots peuvent également être l'hôte de la larve d'un vers parasitaire de type trématode. Une fois la larve adulte, elle se fixe aux végétaux et devient disponible pour les poissons, les oiseaux et l'humain. La dermatite du nageur est une infection reconnue chez l'humain et peut être attribuée à ces larves (Bourget et *al.*, 2011).

## 2.2 Le phosphore et les sédiments

Tout au long du processus menant un lac vers l'eutrophisation, le phytoplancton prolifère, absorbe le surplus de phosphore dans la colonne d'eau, meurt et sédimente. Au fil du temps, les sédiments deviennent tellement chargés en phosphore qu'ils finissent par contribuer eux-mêmes à l'eutrophisation, particulièrement dans le cas des lacs artésiens. À ce stade, le contrôle des apports externes en phosphore au lac pour contrer l'eutrophisation ne suffit plus ; il faut aussi agir de l'intérieur sur les sources internes (Sondergaard et *al.*, 2003).

Les principaux paramètres qui affectent le relargage du phosphore sont le potentiel d'oxydoréduction à l'interface eau-sédiment, le pH ainsi que la température (Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000). D'autres facteurs sont identifiés comme jouant un rôle dans le relargage du phosphore contenu dans les sédiments, notamment la suspension

particulaire, le ratio fer-phosphore, la diffusion chimique, la bioturbation, l'activité microbiologique et la minéralisation (Sondergaard et *al.,* 2003). La figure 12 résume les principaux mécanismes de transport et de mobilisation physico-chimique à l'œuvre dans le relargage du phosphore (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

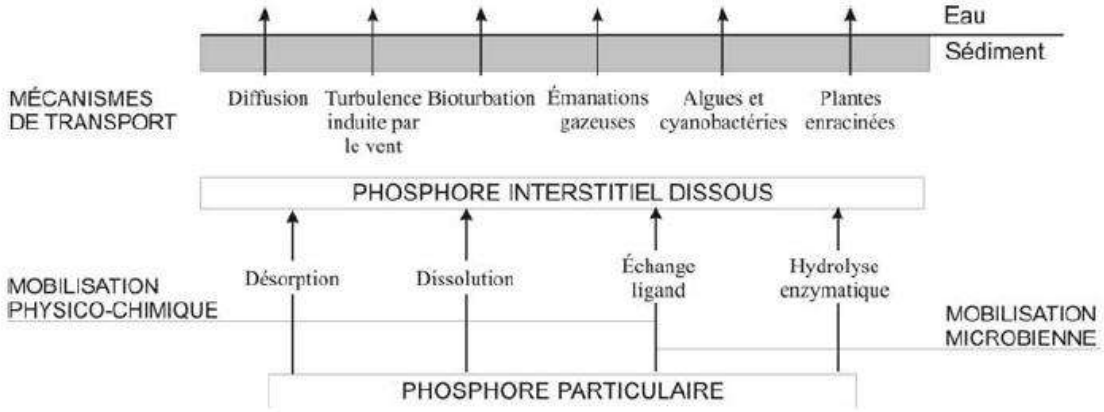


**Figure 12: Mécanismes de relargage du phosphore (Tiré de Consortium DDM – ProFaune, 2005)**

Par ailleurs, les principaux paramètres qui influencent le relargage du phosphore sont influencés par la dynamique saisonnière des lacs (Penn et *al.,* 2000). La compréhension de cette dynamique et de la manière dont elle affecte la colonne d'eau est donc essentielle à l'intégration des connaissances concernant le relargage du phosphore et à l'élaboration de solutions de gestion des sédiments contaminés viables et durables. La figure 13 illustre ce phénomène dans les lacs retrouvés en milieux tempérés (Campbell et Reece, 2004).

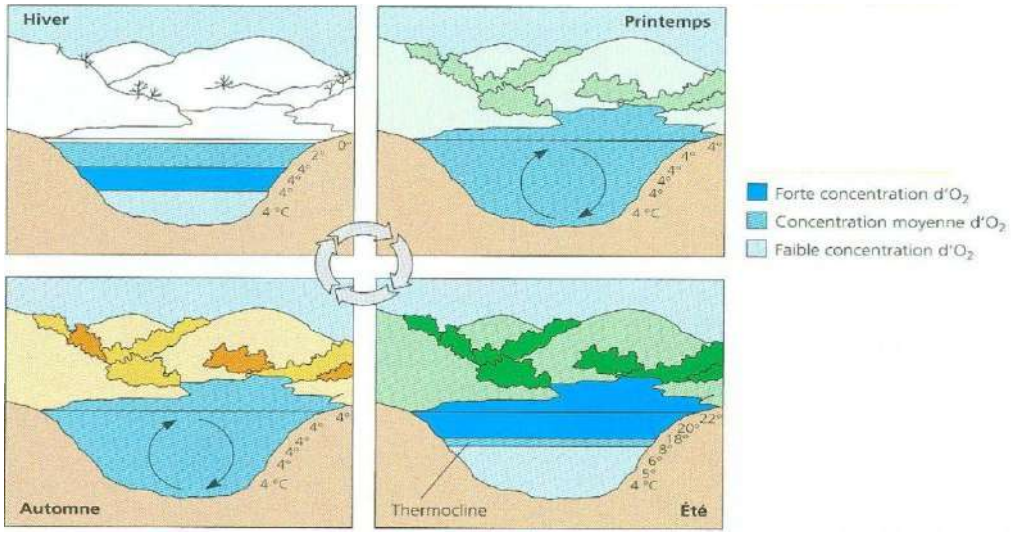


**Figure 13: Dynamique saisonnière des lacs en milieu tempéré (Tiré de Campbell et Reece, 2004)**

La densité de l'eau augmente au fur et à mesure que sa température diminue et atteint un maximum lorsque l'eau est à 4 °C. Dans les régions tempérées, les grands écarts de température entrainent systématiquement des périodes de stratifications et de mélange des eaux. À la fin de l'été, la température de l'épilimnion est plus élevée que celle de l'hypolimnion et la colonne d'eau est stratifiée. À l'automne, la température de l'épilimnion diminue jusqu'à ce que l'eau devienne plus dense que l'hypolimnion. Un premier épisode de brassage complet du lac survient alors, où les eaux de surface viennent oxygéner les eaux profondes. Pendant l'hiver et avec le couvert de glace coupant l'épilimnion du vent, une deuxième période de stratification s'installe jusqu'au printemps. Un second épisode de brassage complet du lac survient suite à la fonte de la glace superficielle et de l'augmentation graduelle de la température de l'eau jusqu'à 4 °C. La stratification verticale se réinstalle au cours de l'été avec l'augmentation graduelle de la température des eaux de surface (Anctil, 2005).

### 2.2.1 Les facteurs d'influence sur le relargage du phosphore

Les lacs eutrophes sont caractérisés par un hypolimnion pauvre en oxygène et un pH légèrement basique causé par un excès de $CO_2$ issu de la respiration du phytoplancton et qui perturbe l'équilibre acido-basique à la hausse (Ryding and Rast, 1994). Les épisodes de brassage et de stratification des lacs en milieu tempéré perturbent à la fois la température de l'eau, les conditions d'oxydoréduction et le pH à l'interface eau-sédiment, ce qui influence le relargage du phosphore (Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000).

Les milieux réducteurs caractérisés par une concentration en oxygène dissous faible, voire nulle, sont propices au relargage du phosphore en comparaison avec les milieux oxydants riches en oxygène (Lee-Hyung et *al.*, 2003). Dans les sédiments, le phosphore lié au fer et au manganèse est particulièrement sensible aux changements dans le potentiel d'oxydoréduction à l'interface eau-sédiments. En effet, un milieu oxydant favorise l'espèce $Fe^{3+}$ pour laquelle le phosphore peut se lier à la forme solide $Fe(OH)_3$ qui précipite et sédimente dans la colonne d'eau. Inversement, la forme soluble $Fe^{2+}$ est favorisée lorsque les conditions deviennent réductrices. Le phosphore autrefois adsorbé sur $Fe^{3+}$ est ainsi solubilisé et devient disponible pour une utilisation par les plantes (Sigg et *al.*, 2006 ; Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000 ; Ryding and Rast, 1994). La figure 14 montre

la spéciation chimique simplifiée du fer selon le potentiel d'oxydoréduction et le pH de l'eau (Fetter, 1999). Selon cette figure, l'hypolimnion anoxique et réducteur typique des lacs eutrophes dont les sédiments sont riches en fer et en manganèse favorise la forme réduite $Fe^{2+}$, ce qui encourage le relargage du phosphore adsorbé sur $Fe(OH)_3$.

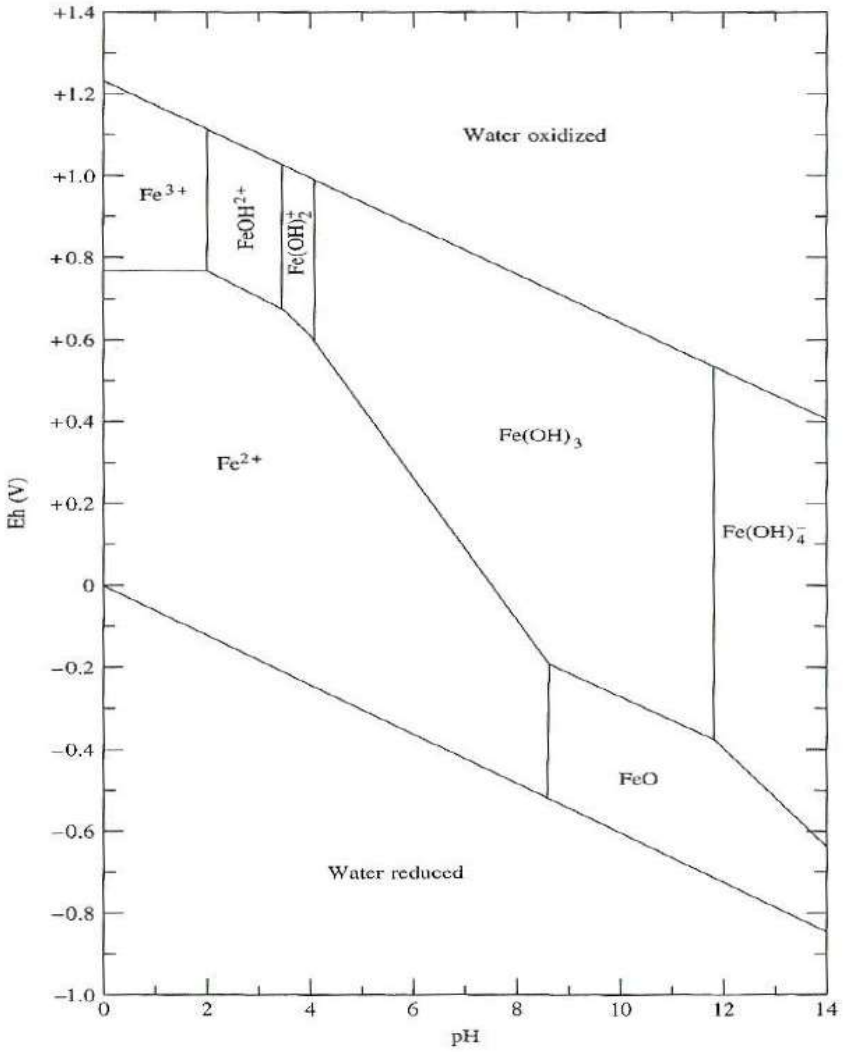


**Figure 14: Diagramme Eh-Ph du fer (Tiré de Fetter, 1999)**

L'influence du pH sur le relargage du phosphore est plus complexe et fait intervenir des processus antagonistes impliquant les équilibres acido-basiques du fer, de l'aluminium et du calcium (Ryding and Rast, 1994). Un pH basique typique des lacs eutrophes réduit la capacité du phosphore à se lier aux atomes de fer et d'aluminium en raison d'une compétition accrue entre les ions $OH^-$ et les phosphates, ce qui augmente le relargage (Brin,

2007 ; Sondergaard et *al.*, 2003). Inversement, un pH acide entraine la dissolution du $CaCO_3$ (Sigg et *al.*, 2006 ; Rydin, 2000), ce qui libère le phosphore ayant coprécipité avec ce composé. Le phosphore soluble réagit avec le carbonate de calcium pour former un composé solide qui sédimente au fond de la colonne d'eau au respect de l'équation chimique suivante (Fetter, 1999):

$$3HPO_4{}^{2-} + 5CaCO_3 + 2H_2O \rightarrow Ca_5(PO_4)_3(OH) + 5HCO_3{}^{-} + OH^-$$

La figure 15 montre la spéciation chimique du carbonate de calcium en fonction du pH à une pression de 1 atm. Le pH d'équilibre à 5,92 indique qu'en dessous de cette valeur, la forme soluble $Ca^{2+}$ est favorisée, entrainant la solubilisation du phosphore ayant coprécipité avec la forme solide $CaCO_3$ (Hubbard, 2002).

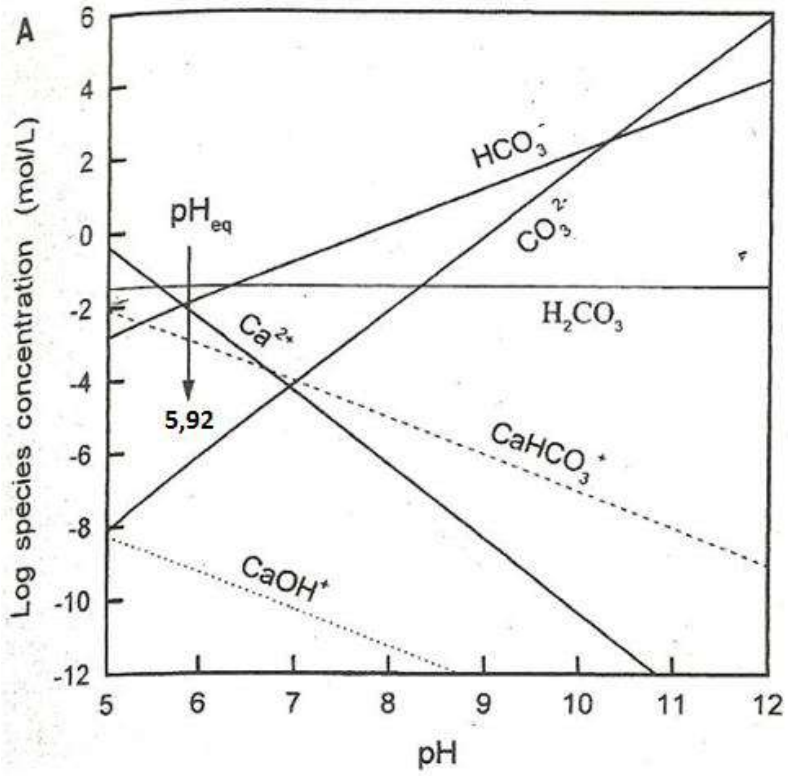


**Figure 15 : Diagramme de distribution du carbonate de calcium selon le pH (Tiré de Hubbard, 2002)**

Les eaux basiques d'un lac eutrophe inhibent donc le relargage si la spéciation chimique du phosphore retrouvé dans les sédiments montre une forte proportion du phosphore lié au carbonate de calcium. L'influence du pH sur le relargage dépend donc fortement de la

spéciation chimique du phosphore retrouvé dans les sédiments (Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000 ; Rydin, 2000).

Autrement, le relargage du phosphore augmente avec la température de l'eau (Lee-Hyung et *al.*, 2003). En effet et en référence à la figure 12, l'activité microbienne augmente avec la température et consomme l'oxygène dissous, ce qui contribue à la solubilisation du phosphore particulaire (Sondergaard et *al.*, 2003 ; Ryding and Rast, 1994). À priori, le printemps semble être une bonne période pour procéder à la restauration d'un lac eutrophe en milieu tempéré puisque c'est la période de l'année où le relargage du phosphore provenant des sédiments atteint son minimum annuel. Ce minimum annuel s'explique par la faible température de l'eau ainsi qu'au brassage printanier qui a oxygéné l'interface eau-sédiment et qui a déplacé le potentiel d'oxydoréduction vers un milieu oxydant.

La suspension particulaire est un autre facteur aggravant le relargage du phosphore contenu dans les sédiments puisque les conditions physico-chimiques changent au sein de la colonne d'eau (Sigg et *al*, 2006 ; Sondergaard et *al.*, 2003 ; Environnement Canada, 1994). Comme la profondeur d'un lac diminue plus l'eutrophisation s'installe, l'impact du vent sur la mise en suspension des sédiments devient de plus en plus significatif avec le temps (Anctil, 2005). D'autres activités peuvent entraîner la remise en suspension des sédiments, la dispersion des eaux interstitielles contaminées ou la désorption des contaminants. C'est le cas notamment des bateaux à moteur qui accentuent le relargage par la remise en suspension des sédiments, en plus d'entraîner la diminution de la transparence de l'eau et des concentrations en oxygène dissous (Anthony and Downing, 2003 ; Irvine et *al.*, 1997).

### 2.2.2 La situation au lac Saint-Augustin

Les sédiments du lac Saint-Augustin sont fortement contaminés en phosphore à raison de 1209 mg $P_{tot}$/kg de sédiments secs en moyenne. De ce total, les formes inorganiques associées au fer et au carbonate de calcium sont respectivement de 200 mg P-Fe et 491 P-Ca par kilogramme de sédiments secs (Brin, 2007). De plus, le pH des eaux du lac Saint-Augustin est légèrement basique, ce qui favorise le relargage du phosphore lié au fer de façon naturelle. Toutefois, un pH acide viendrait solliciter le phosphore lié au carbonate de

calcium qui est présent en plus grande proportion dans les sédiments du lac Saint-Augustin (Sondergaard et *al.*, 2003 ; Hubbard, 2002 ; Penn et *al.*, 2000).

Les travaux de Brin ont montré que le relargage en phosphore pourrait être plus important en conditions basique et aérobie pour le cas du lac Saint-Augustin (Brin, 2007). Cette tendance n'a pas trouvé d'explications avec l'oxygène dissous, le relargage du phosphore étant plus important en théorie lorsque les conditions sont réductrices (Sontergaard et *al.*, 2003). À propos, un sol est considéré réducteur à pH 7 si son potentiel d'oxydoréduction est inférieur à + 100 mV (Galvez-Cloutier et *al.*, 2002). Enfin, la concentration en oxygène dissous à l'interface eau-sédiment d'un lac eutrophe peut grandement diminuer au cours d'un été et atteindre des conditions très proches de l'anoxie (Bourget et *al.,* 2011 ; Anctil, 2005 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005), favorisant ainsi le relargage du phosphore (Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000). En général, le potentiel d'oxydoréduction à l'interface eau-sédiment au lac Saint-Augustin est sous la barre des + 100 mV (Brin et Dominguez, 2002), ce qui favorise en théorie le relargage du phosphore (Sontergaard et *al.*, 2003).

Il faut tenir compte de la spéciation chimique du phosphore dans les sédiments pour l'élaboration de scénarios de décontamination. En effet, l'ajout d'un coagulant comme l'alun dans l'eau s'accompagne d'une diminution du pH et peut avoir une incidence sur la spéciation chimique des éléments retrouvés dans la colonne d'eau (Crittenden et *al.*, 2005). Il faut donc s'assurer que l'eau de surface a un pouvoir tampon suffisant pour que l'ajout d'alun n'entraîne pas une diminution importante du pH, ce qui aurait pour effet de solubiliser le phosphore lié au carbonate de calcium. Les essais réalisés au lac Saint-Augustin avec l'alun ont montré une diminution du pH qui n'était toutefois pas suffisante pour faire descendre le pH vers les valeurs acides, ce qui témoigne du bon pouvoir tampon des eaux du lac (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011).

L'ajout d'alun peut aussi s'accompagner d'une augmentation des ions $Al^{3+}$ dans la colonne d'eau. Dépendamment du pH, ces ions peuvent être toxiques pour certains organismes benthiques appartenant à la biodiversité du lac. Certains effets mineurs ont déjà d'ailleurs été observés sur les organismes *Pseudokirchneriella subcapitata* et *Daphna magna*. Ces effets peuvent inclure la diminution de la reproduction des organismes benthiques et

l'inhibition de la croissance des algues (Soumis-Dugas et *al.,* 2009). Néanmoins, l'alun utilisé dans les procédés testés au volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin n'a pas entraîné d'effets nuisibles sur la survie et la reproduction des daphnies et des amphipodes retrouvés au lac Saint-Augustin (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012).

## 2.3 Les métaux lourds et les sédiments

Les sédiments du lac Saint-Augustin sont également contaminés par des métaux lourds et des métalloïdes. Ces éléments sont très toxiques pour les êtres humains et la faune et ont des répercussions importantes sur la santé et l'environnement. Les deux métaux les plus dommageables sur la santé sont le mercure (Hg) et le cadmium (Cd) puisqu'ils bloquent les activités enzymatiques du métabolisme des organismes vivants. Ils sont suivis de près par le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le chrome (Cr) et le zinc (Zn) (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Tous ces métaux sont retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin (Brin, 2007 ; Dominguez, 2004; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003 ; Brin et Dominguez, 2002).

Certains métaux tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le molybdène (Mo) et le manganèse (Mn) sont essentiels à la croissance des plantes et s'accumulent dans leurs tissus (Galvez-Cloutier, 2009). La phytorestauration fait d'ailleurs de plus en plus l'objet de recherches pour le traitement des sols contaminés (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005b).

Dans les milieux naturels, les métaux lourds sont essentiellement issus de la déposition atmosphérique. Les effluents commerciaux, industriels, domestiques et les eaux de ruissellement urbain sont des apports anthropogéniques importants et constituent une source de contamination additionnelle (Galvez-Cloutier, 2009 ; Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Metcalf & Eddy, 2003). Les lacs eutrophes sont caractérisés par un taux de sédimentation important en raison de l'intense productivité de la colonne d'eau. Les métaux sont donc sujets à s'adsorber sur ces particules qui sédimentent et à s'accumuler au fond du lac dans les sédiments (Parant, 2007 ; Sigg et *al.*, 2006).

Au lac Saint-Augustin, les métaux lourds sont apportés principalement par le ruissellement urbain provenant à la fois des zones résidentielles et de l'autoroute Félix-Leclerc. Les

particules transportées par les eaux de ruissellement contiennent des métaux lourds issus de la corrosion des voitures et des hydrocarbures qui peuvent en contenir. Les activités passées d'une base d'hydravion ont également été une source importante de contamination en métaux lourds pour les sédiments du lac Saint-Augustin. Parmi l'ensemble des métaux lourds, le cuivre, le cadmium, le plomb et le zinc ont été retenus comme étant les principaux contaminants métalliques d'importance. Enfin, le mercure et l'arsenic sont retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin et affichent des concentrations proches des seuils d'effets mineurs définis pour ces métaux, sans toutefois les dépasser en moyenne (Brin, 2007 ; Dominguez, 2004 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003 ; Brin et Dominguez, 2002).

### 2.3.1 Les facteurs d'influence sur le relargage des métaux lourds

Les deux principaux facteurs qui affectent la rétention des métaux lourds dans les sédiments sont le potentiel d'oxydoréduction et le pH. En outre, le potentiel de dissolution de chaque métal dépend de la nature de ses associations géochimiques avec les différents constituants du sol (Brin, 2007 ; Eggleton and Thomas, 2004 ; Galvez-Cloutier et Dubé, 1998b). En laboratoire, l'extraction séquentielle sélective utilise les deux principaux facteurs nommés ci-dessus au sein de réactifs de force croissante pour déterminer la spéciation chimique des métaux retrouvés dans une matrice de sol ou de sédiments (Yong and Galvez-Cloutier, 1993 ; Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005b).

Les métaux adoptant plusieurs états d'oxydation ont une spéciation chimique sensible aux changements du potentiel d'oxydoréduction. En général, les métaux sont plus fortement retenus lorsque les conditions sont oxydantes, en particulier si les sédiments sont riches en oxydes/hydroxydes de fer et/ou manganèse ainsi qu'en matière organique. À l'inverse, un milieu réducteur facilite la dissolution de complexes chimiques, ce qui augmente la disponibilité des métaux dans la colonne d'eau (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a).

La solubilité des métaux augmente à mesure que le pH diminue, ce qui les rend biologiquement disponibles dans la colonne d'eau. Lorsque le pH est acide, les ions $H^+$ entrent en compétition avec les métaux adsorbés sur les surfaces chargées négativement des particules de sols et il y a relargage (Sigg et *al.*, 2006 ; Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Hubbard, 2002). Aussi, la spéciation chimique pour un métal est variable selon le

pH – certaines espèces étant plus favorisées que d'autres selon la force du milieu acide ou basique. Un bon pouvoir tampon est donc requis pour ralentir la mobilité de ces contaminants suite à l'ajout d'un coagulant comme l'alun, par exemple (Crittenden et *al.*, 2005).

Dans la colonne d'eau, le pH et le potentiel d'oxydoréduction sont variables selon que l'on se trouve à l'interface eau-sédiment ou à la surface. Les conditions anoxiques et réductrices typiques de l'hypolimnion des lacs eutrophes favorisent le relargage des métaux. Les métaux ainsi solubilisés migrent vers la colonne d'eau et peuvent précipiter à nouveau si le milieu devient oxydant ou s'il y a une augmentation du pH, ce qui contribue à augmenter l'étendue de la contamination (Sigg et *al.*, 2006 ; Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Eggleton and Thomas, 2004 ; Yong et Galvez-Cloutier, 1993). La figure 16 schématise le cycle des métaux lourds dans un système lacustre et met en évidence les différents apports possibles ainsi que les mécanismes pouvant affecter la sédimentation et la solubilisation de ces éléments dans l'eau.

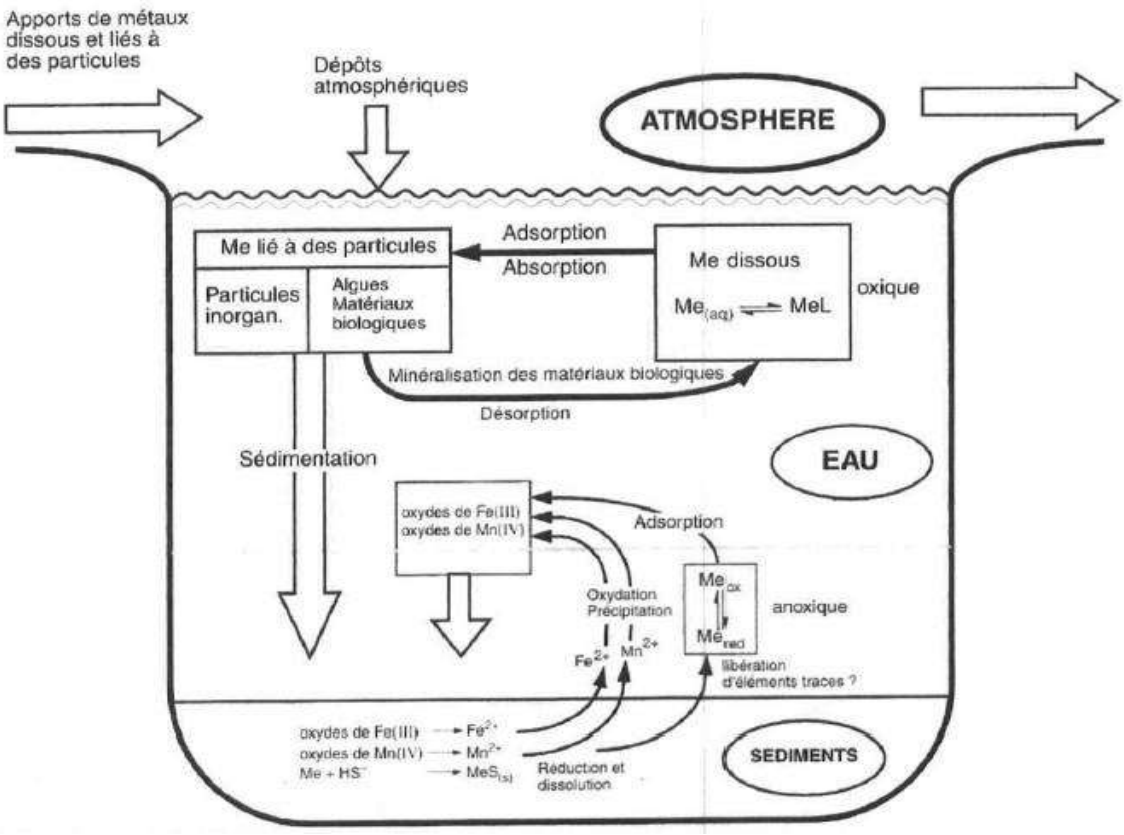


**Figure 16: Cycle des métaux lourds dans un lac (Tiré de Sigg et *al.*, 2006)**

Une perturbation physique causant la remise en suspension des sédiments peut entrainer l'oxygénation des eaux hypolimniques tout en diminuant le pH par l'oxydation des sulfures, ce qui a pour effet d'accroître davantage le relargage (Eggleton and Thomas, 2004). Les principaux métaux lourds sujets au relargage suite à un changement dans les conditions de pH ou de potentiel d'oxydoréduction sont l'arsenic, le cadmium, le chrome, le mercure, le plomb et le zinc (Environnement Canada et MDDEP, 2007). Dans le cas des lacs peu profonds, l'action du vent de même que les bateaux à moteur peuvent occasionner une importante suspension des sédiments et ainsi affecter la qualité de l'eau (Anthony and Downing, 2003 ; Irvine et *al.*, 1997). Par ailleurs, les stratégies globales de gestion des sédiments contaminés peuvent entraîner une remise en suspension des sédiments dont l'intensité est variable et il faut en tenir compte dans le choix de la méthode finale à retenir (Birdwell and Thibodeaux, 2007 ; Environnement Canada, 1994).

### 2.3.2. La situation au lac Saint-Augustin

Le pH des eaux du lac Saint-Augustin est typique des lacs eutrophes et est légèrement basique (Brin, 2007 ; Ryding and Rast, 1994). À priori et en ne considérant que le pH, les eaux du lac Saint-Augustin ne semblent pas favoriser la solubilisation des métaux lourds contenus dans les sédiments et offrent un pouvoir tampon suffisant pour résister à une attaque acide causée par l'ajout d'un coagulant comme l'alun (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012; Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011 ; Crittenden et *al.,* 2005).

Les stratifications estivales et hivernales des lacs en milieu tempéré peuvent entraîner une diminution significative de l'oxygène dissous au niveau de l'hypolimnion (Anctil, 2005), ce qui favorise théoriquement le relargage (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a). Cependant, bien qu'une anoxie complète de l'hypolimnion soit possible dans le cas des lacs eutrophes (Anctil, 2005 ; IETC, 1999 ; Ryding and Rast, 1994), l'interface eau-sédiment du lac Saint-Augustin n'est jamais descendue sous la barre des 2 mg OD[3]/L lors du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin réalisé à l'été 2009 (Bourget et *al.,* 2011). Durant ce même été, des conditions d'anoxie ont quand même été observées dans le cadre d'une étude en parallèle réalisée par la ville de Québec (Martineau, 2009). Des conditions

[3] Oxygène dissous.

d'anoxie de l'hypolimnion ont aussi été observées à l'été 2004 de façon périodique (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

En somme, les conditions retrouvées sur le site du lac Saint-Augustin ne semblent pas naturellement et immédiatement favoriser le relargage des métaux lourds (Parant, 2007). Toutefois, des conditions d'anoxie complète ne sont pas à exclure vu la nature eutrophe du lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Ryding and Rast, 1994) et le potentiel de relargage est appelé à changer si le milieu devient fortement réducteur ou si le pH diminue vers les valeurs acides pendant une période prolongée (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a). Par ailleurs, le cadmium présent dans les sédiments du lac Saint-Augustin affiche une spéciation plus forte pour les métaux échangeables par rapport au zinc, au cuivre et au plomb qui sont davantage liés aux carbonates ainsi qu'aux oxydes/hydroxydes (Dominguez, 2004). En conséquence, le cadmium se solubilise plus facilement par compétition cationique à la suite d'un changement au niveau du pH ou du potentiel d'oxydoréduction près de l'interface eau-sédiments (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Yong and Galvez-Cloutier, 1993).

## 2.4 Les stratégies de gestion des sédiments contaminés

Plusieurs stratégies sont disponibles afin d'améliorer l'état de santé des lacs eutrophes. Bien entendu, il faut d'abord contrôler à la source les apports anthropogéniques externes des contaminants qui alimentent le lac. De plus, lors de l'élaboration de stratégies ou scénarios de gestion des sédiments contaminés, il faut veiller à intégrer de manière structurante les initiatives de restauration déjà existantes au sein du bassin versant. Un plan directeur a été réalisé au lac Saint-Augustin et le sommaire des actions recommandées dans ce document est présenté à l'annexe A. Les apports externes en phosphores sont contrôlés pour la grande majorité au lac Saint-Augustin et les apports résiduels le seront sous peu suite au raccordement des résidences possédant des fosses septiques non conformes à un réseau d'égouts (Saint-Augustin-de-Desmaures, 2011). Les stratégies proposées pour ce projet de maîtrise sont donc principalement axées sur le contrôle interne des contaminants provenant des sédiments par relargage.

Des objectifs spécifiques à ce projet de maîtrise visant à proposer un scénario pour la meilleure gestion possible des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin ont été définis à la section 1.3 du chapitre 1. Le premier objectif stipule que les différents scénarios de gestion des sédiments contaminés à construire doivent être élaborés à partir des procédés testés à l'échelle pilote dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Ces procédés incluent la précipitation du phosphore particulaire et des colloïdes par l'ajout d'alun, le confinement des sédiments contaminés à travers la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable de même que le dragage des sédiments contaminés. Ces procédés sont donc présentés en détails dans cette section portant sur les stratégies disponibles pour la gestion des sédiments contaminés. Une revue plus large des autres procédés disponibles dans la littérature pour la gestion du phosphore dans les lacs eutrophes est également effectuée. Ceux-ci incluent l'aération de l'hypolimnion, le bris de la thermocline par circulation intense, la diminution du temps de rétention hydraulique, l'évacuation sélective des eaux de l'hypolimnion et le contrôle interne de la biodiversité (Ryding and Rast, 1994 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005).

### 2.4.1 La coagulation du phosphore par l'ajout d'alun

L'ajout d'alun dans la colonne d'eau est une approche physico-chimique qui vise à faire précipiter le phosphore particulaire et les colloïdes. Comme les particules en suspension sont typiquement chargées négativement dans les milieux naturels (Sigg et *al.*, 2006; Hubbard, 2002), ils se repoussent et ne tendent pas à former des flocs suffisamment lourds pour précipiter. L'ajout d'un coagulant contenant un ion métallique fortement chargé positivement comme l'aluminium ou le fer vient réduire cette force de répulsion. Les particules se rapprochent et forment des flocs plus denses et plus lourds qui précipitent plus facilement. Il est important de bien doser le coagulant en laboratoire à l'aide de *jar tests* pour ne pas causer le phénomène inverse : une surabondance de charges positives (Critenden et *al.*, 2005). Pour le cas du lac Saint-Augustin, l'aluminium est préféré au fer puisqu'une quantité moindre est requise pour obtenir un même niveau de performance (Parant, 2007). De plus, l'utilisation de sels de fer comme coagulant peut entraîner la solubilisation du phosphore si les conditions à l'interface eau-sédiment deviennent réductrices, ce qui est fréquemment le cas pour les lacs eutrophes (Klapper, 2003).

L'ajout d'un coagulant comme l'alun dans l'eau entraîne également une diminution du pH résultant de la réaction de l'ion métallique avec l'eau. Un bon pouvoir tampon est donc requis afin de limiter l'impact de cette baisse de pH dans les eaux naturelles (Crittenden et *al.*, 2005). Une eau possédant un faible pouvoir tampon verra son pH diminuer suite à l'application d'alun, ce qui favorise les composés toxiques d'aluminium et peut nuire à la communauté benthique et aux poissons (Mattson et *al.*, 2003). L'équation chimique suivante montre la réaction de l'alun avec l'eau (Crittenden et *al.*, 2005).

$$Al_2SO_4 \cdot 14H_2O \rightarrow 2Al^{3+} + 3SO_4^{2-} + 14H_2O$$

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_{3(s)} + 3H^+$$

Le diagramme de solubilité de l'aluminium donne des informations sur la spéciation de cet élément selon le pH et peut être consulté à l'annexe B. Selon ce diagramme, l'efficacité de la coagulation est optimale pour les valeurs de pH comprises entre 7 et 8 (Crittenden et *al.*, 2005), ce qui est précisément le cas pour les eaux de surface du lac Saint-Augustin (Parant, 2007). Pour une performance optimale de précipitation, l'ajout d'alun doit être suivi de phases d'agitation rapide et lente pour bien répartir le coagulant dans la colonne d'eau (Crittenden et *al.,* 2005). Bien que des efficacités optimales d'enlèvement aient été observées pour un dosage d'alun de 30 mg/L au lac Saint-Augustin, le MDDEP recommande une concentration maximale de 20 mg/L (Parant, 2007).

Les avantages de la coagulation du phosphore particulaire et des colloïdes par l'ajout d'alun résident dans son faible coût d'implantation, sa faible complexité technique et le faible temps requis pour l'application du coagulant à l'échelle d'un lac. De plus, les impacts négatifs sur la faune et l'environnement sont faibles si le pH est contrôlé adéquatement. Les impacts sur le milieu humain se limitent à la nuisance sonore causée par les embarcations utilisées pour l'application du coagulant. Par contre, il s'agit d'un procédé peu durable dont l'efficacité à l'échelle d'un lac est variable (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

Ce procédé a été testé dans le cadre du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Suite à l'ajout d'alun dans les eaux du lac Saint-Augustin, les concentrations en phosphore soluble ont immédiatement diminué pour ensuite remonter rapidement aux valeurs initiales observées avant l'application du traitement. Cette remontée

est expliquée par la présence de gastéropodes au fond du lac dont les activités de broutage causent la remise en suspension des sédiments et des colloïdes précipités. Par ailleurs, bien que les concentrations en aluminium aient augmenté suite à l'ajout du coagulant, celles-ci ont diminué rapidement pour rejoindre la concentration moyenne retrouvée dans les eaux du lac Saint-Augustin (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011).

### 2.4.2 Le recouvrement actif des sédiments

Le recouvrement actif des sédiments est une méthode où les sédiments contaminés sont isolés physiquement ou chimiquement de la colonne d'eau à l'aide d'un matériau de recouvrement faisant office de barrière. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la couche de recouvrement : sol argileux, sable, géomembranes, géotextile ou encore des sédiments non contaminés (Lyons et *al.,* 2006 ; Ryding and Rast, 1994). Plus récemment, l'intérêt de la roche calcaire comme matériau de recouvrement actif s'est accentué en raison de son potentiel d'adsorption du phosphore et de certains métaux lourds (Parant, 2007 ; Dominguez, 2004). L'agent actif retrouvé sur la pierre calcaire, la calcite ($CaCO_3$), réduit les concentrations retrouvées en phosphore dans l'eau à travers des mécanismes d'adsorption et de co-précipitation (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012). Il s'agit d'une méthode économique et efficace ayant été appliquée avec succès sur de nombreux plans d'eau contaminés dans le monde (Palermo, 1998) et plus récemment au lac Saint-Augustin (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011).

Plus spécifiquement, les trois objectifs qui sous-tendent le recouvrement actif des sédiments contaminés sont énumérés ci-dessous (Palermo, 1998) :

- isolation physique des sédiments contaminés de la colonne d'eau et de la faune benthique ;
- stabilisation des sédiments contaminés en prévenant la remise en suspension et le transport interne ;
- réduction des flux de contaminant provenant des eaux souterraines vers la colonne d'eau.

Le choix du matériau de recouvrement se fonde sur plusieurs facteurs dont la réactivité, la gravité spécifique, la toxicité, l'impact environnemental, la disponibilité locale des matériaux et les coûts. En effet, le matériau choisi doit permettre la séquestration des contaminants selon différents mécanismes physico-chimiques et doit être plus dense que l'eau. Il doit aussi être non toxique pour l'environnement, générer pas ou très peu d'impacts négatifs sur l'environnement et doit être disponible à un coût raisonnable (Parant, 2007 ; Heathcote, 1998). Lors de l'application du matériau de recouvrement, il est recommandé de minimiser la remise en suspension des sédiments et d'attendre un certain temps entre l'application de chacune des couches de matériau afin de permettre une consolidation adéquate des sédiments et du matériau de recouvrement. Les techniques d'application incluent les diffuseurs submergés ou encore l'application à partir de la surface à l'aide de barges. Des équipement de dragage peuvent également être modifiés et utilisés pour l'application des matériaux de recouvrement (Lyons et *al.*, 2006 ; Fredette and French, 2004 ; Zeman, 1994).

Les avantages associés à la mise en place d'un matériau de recouvrement actif sur les sédiments contaminés concernent l'efficacité de la méthode ainsi que le coût relativement abordable d'une telle solution (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Bien sûr, les coûts associés à l'application d'un tel procédé à l'échelle d'un lac de même que la durée des travaux sont fonction de l'épaisseur requise en matériaux de recouvrement et de la superficie à couvrir. La méthode d'application a également une influence sur les coûts. En effet, les matériaux de recouvrement doivent être appliqués de manière à minimiser la remise en suspension des sédiments afin de prévenir le relargage des contaminants. Malheureusement, les technologies efficaces pour conserver l'intégrité de l'interface eau-sédiment sont souvent celles qui coûtent le plus cher (Lyons et *al.*, 2006 ; Dominguez, 2004). Les impacts sur le milieu naturel sont généralement limités et les impacts sur le milieu humain touchent principalement le climat sonore (bruit) ainsi que le risque accru d'accidents routiers associé à la livraison des matériaux de recouvrement (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

Par contre, les matériaux utilisés comme pour le recouvrement actif finiront par se saturer en contaminants, ce qui en fait une solution temporaire (Vohla et *al.*, 2011). De plus, des

difficultés lors de l'application sont à prévoir si les pentes du fond du lac à recouvrir sont prononcées. Un impact négatif peut être associé à la diminution de la hauteur d'eau suite à la mise en place du matériau de recouvrement (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

La mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable a été testée lors du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin et a engendré une diminution allant de 59% à 84% des concentrations retrouvées en phosphore soluble dans la colonne d'eau. Dans un premier temps, 10 cm de pierre calcaire ont été mis en place afin de retenir le phosphore provenant des sédiments par relargage. Une couche additionnelle de 10 cm de sable a ensuite été rajoutée afin de stabiliser la couche sous-jacente de pierre calcaire (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.,* 2011 ; Bourget, 2011). La couche de sable a aussi pour fonction de prévenir la dégradation de la couche de pierre calcaire par la bioturbation des organismes benthiques ou suite aux perturbations provenant de la surface (Eggleton and Thomas, 2004 ; Klapper, 2003). Le choix de la pierre calcaire comme matériau de recouvrement actif au lac Saint-Augustin repose sur son potentiel d'adsorption du phosphore pouvant aller jusqu'à 70 mg de phosphore par kg de calcaire. Des résultats plus élevés allant jusqu'à 300 mg P/kg ont toutefois été obtenus en laboratoire (Parant, 2007).

Enfin, les matériaux de recouvrement actif peuvent être mis en place à la suite de la coagulation du phosphore particulaire et des colloïdes par l'ajout d'alun, ce qui permet d'accroître considérablement la performance du traitement. De fait, le rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau pour le procédé combinant coagulation à l'alun et recouvrement actif des sédiments contaminés a atteint 95% lors du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin à l'été 2009. De plus, les conditions environnementales faisant suite à l'application de ce procédé ont été favorables à la croissance et à la recolonisation du zooplancton dans les eaux du lac Saint-Augustin (Galvez-Cloutier et *al*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011).

### 2.4.3 Enlèvement du phosphore par dragage

Lorsque les sédiments d'un plan d'eau sont lourdement contaminés et que les conditions du milieu favorisent le relargage de ces contaminants, une solution possible est l'enlèvement

des sédiments problématiques par dragage. Les principaux avantages associés au dragage des sédiments contaminés résident dans l'efficacité et la durabilité de ces méthodes à long terme. Dépendamment de la méthode de dragage envisagée, les nuisances sur le milieu humain sont modérées et touchent principalement la modification du climat sonore et le risque accru d'accidents issu du transport des sédiments par camions une fois extraits. Dans le cas des lacs eutrophes, le dragage des sédiments permet également d'accroître la hauteur de la colonne d'eau tout en réduisant la demande en oxygène des eaux profondes (Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Klapper, 2003).

À l'inverse, les principaux désavantages liés à cette option sont les coûts élevés d'application, les impacts sur les organismes vivants et la qualité de l'eau à travers la remise en suspension des sédiments lors du dragage et la disposition des sédiments après extraction (Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Klapper, 2003 ; Mattson et *al.*, 2003 ; Environnement Canada, 1994 ; Ryding and Rast, 1994). Comme certains des organismes caractéristiques des milieux eutrophes contribuent à aggraver l'état de santé du plan d'eau par leur caractère envahissant ou leur toxicité, une réflexion s'impose sur la grandeur de l'impact négatif issu du dragage sur ces organismes. Par ailleurs, dans le cas où les sédiments seraient uniquement contaminés par le phosphore, leur réutilisation à des fins agricoles est possible et encouragée (Klapper, 2003).

Néanmoins, dans le cas du lac Saint-Augustin, les sédiments sont aussi contaminés par des métaux lourds (Brin, 2007 ; Dominguez, 2004 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003 ; Brin et Dominguez, 2002). Les sédiments du lac Saint-Augustin sont donc sujets à des dispositions particulières au respect de la *Loi sur la Qualité de l'Environnement,* de la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés* et du *Règlement sur le stockage et les centres de transfert des sols contaminés* (Ville de Québec, 2009). Comme les concentrations en métaux lourds retrouvées dans les sédiments du lac Saint-Augustin ne dépassent pas le niveau B pour les sols, ceux-ci peuvent être réutilisés ou valorisés sans problèmes. Par exemple, les sédiments dragués peuvent être utilisés comme matériau de recouvrement pour les lieux d'enfouissement sanitaire. Ils peuvent aussi être utilisés comme remblai sur des terrains contaminés à vocation résidentielle en voie de réhabilitation de même que des terrains à vocation commerciale ou industrielle, à la condition de ne pas

augmenter la contamination du terrain récepteur (MDDEP, 2011b ; Ville de Québec, 2009 ; Consortium DDM –ProFaune, 2005). L'annexe C présente les principaux critères de sols et les met en relation avec les concentrations retrouvées au lac Saint-Augustin. L'annexe D illustre les options de gestions disponibles selon le niveau de contamination retrouvé dans les sols contaminés (MDDEP, 2011b).

Plusieurs méthodes de dragage des sédiments sont disponibles et ont des coûts plus ou moins élevés selon les besoins et les objectifs à atteindre. Néanmoins, le stress généré par les activités de dragage sur la communauté benthique est lié à l'augmentation des particules en suspension au sein de la colonne d'eau (Suedel et *al*, 2008 ; Birdwell and Thibodeaux, 2007 ; Mattson et *al.*, 2003). Par ailleurs, certaines techniques génèrent une remise en suspension des sédiments plus importante, ce qui favorise le relargage des contaminants dans la colonne d'eau (Environnement Canada, 2004). En d'autres mots, plus la remise en suspension des sédiments est importante lors du dragage, plus les impacts négatifs sur la biodiversité et la qualité de l'eau sont grands.

Les méthodes de dragage conventionnelles se divisent en deux grandes familles : le dragage mécanique et le dragage hydraulique à succion. Dans le premier cas, les sédiments sont extraits mécaniquement du plan d'eau à l'aide d'une benne ou d'un dispositif permettant de récolter les sédiments en vrac. Le dragage hydraulique est plutôt caractérisé par l'aspiration des sédiments à l'aide d'une pompe qui génère une succion suffisante pour extraire les sédiments du fond du lac. Ces deux méthodes possèdent des particularités qui sont détaillées plus loin dans cette section. Plusieurs types de dragues sont disponibles au sein de ces deux grandes familles (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004 ; Palermo, 1991). La figure 17 représente schématiquement le dragage mécanique (haut) et le dragage hydraulique à succion (bas) (Birdwell and Thibodeaux, 2007 ; Mattson et *al.*, 2003).

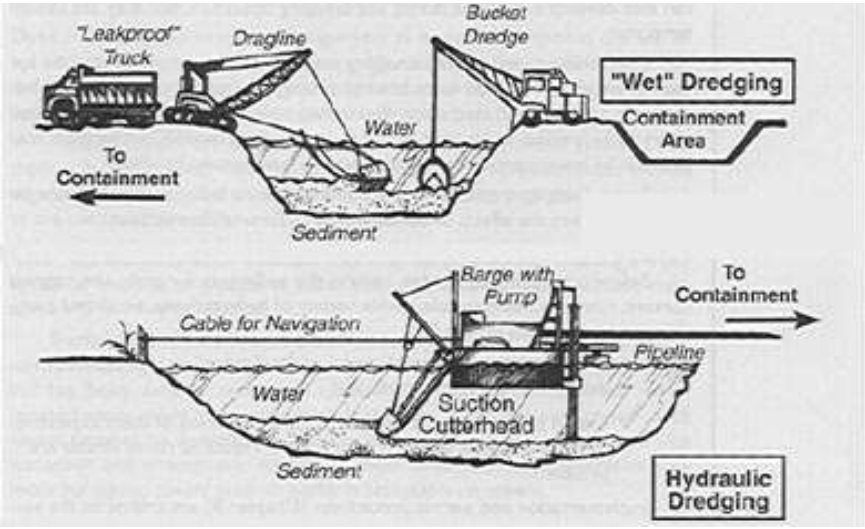


**Figure 17: Dragage mécanique (haut) et hydraulique par succion (bas) (Tiré de Mattson et *al.*, 2003)**

La remise en suspension des sédiments est moins importante pour le dragage hydraulique que pour le dragage mécanique. En fait, la remise en suspension survient principalement à l'interface eau-sédiment dans le cas du dragage hydraulique et sur toute la colonne d'eau dans le cas du dragage mécanique. Une remise en suspension plus importante augmente le risque d'accroître l'étendue des zones contaminées en plus d'affecter négativement la qualité de l'eau et d'augmenter les impacts sur la biodiversité du milieu. La mise en place de rideaux de turbidité permet de limiter l'impact négatif associé à la remise en suspension des sédiments lors des opérations de dragage. Aussi, le dragage hydraulique nécessite un équipement plus spécialisé qui peut entraîner une augmentation des coûts d'implantation en comparaison avec le dragage mécanique. Enfin, alors que le dragage hydraulique semble être plus approprié pour l'enlèvement des sédiments lâches et non consolidés, le dragage mécanique est davantage utilisé lorsque les matériaux à extraire sont plus compacts (DESSAU, 2011 ; Ville de Québec, 2009 ; Suedel et *al.*, 2008 ; Birdwell and Thibodeaux, 2007 ; Eggleton and Thomas, 2004 ; Mattson et *al.*, 2003 ; Anchor Environmental CA, 2003 ; Environnement Canada, 1994)

De plus, bien que le dragage hydraulique puisse se faire en continu, il nécessite des conduites et infrastructures qui peuvent obstruer la navigation de plaisance et causer des problèmes lors d'épisodes de fort courant (Birdwell and Thibodeaux, 2007). Lorsque le temps de renouvellement des eaux est élevé, il faut veiller à ce que les opérations de

pompage des sédiments n'entrainent pas une diminution trop importante du niveau d'eau. Pour ce faire, une source d'eau extérieure peut être acheminée au lac par pompage ou les opérations de dragage peuvent aussi s'échelonner sur une plus longue période (Ville de Québec, 2009).

L'extraction de sédiments contaminés génère deux phases qu'il convient de séparer : une phase liquide et une phase solide. Pour ce faire, plusieurs techniques sont disponibles : polymérisation/filtration des boues pompées (dragage hydraulique), décantation, coagulation/floculation, hydrocyclone, centrifugeuse, évaporateur, etc. La phase solide peut alors être valorisée dépendamment de son niveau de contamination. La phase liquide peut être retournée au milieu récepteur ou vers une unité de traitement additionnel au besoin (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004).

Le dragage hydraulique avec polymérisation et filtration des boues pompées permet une excellente séparation des phases issues du dragage. En effet, le polymère ajouté aux sédiments pompés permet d'obtenir des flocs plus gros qui sédimentent plus facilement. Les boues ainsi polymérisées peuvent ensuite être filtrées à travers un sac filtrant et la phase liquide peut être retournée au lac ou vers une unité de traitement supplémentaire au besoin. Ce mode de séparation des phases est rendu possible avec le dragage hydraulique puisque l'ensemble des opérations s'effectue en circuit fermé, ce qui n'est pas le cas du dragage mécanique. Les sédiments extraits par dragage mécanique ou hydraulique peuvent également être centrifugés, décantés ou encore faire l'objet d'un épandage sur des terres avoisinantes pour fertilisation (Bourget et *al.*, 2011 ; Ville de Québec, 2009).

Les sédiments dragués peuvent aussi être directement réintroduits et confinés à l'intérieur d'une zone prédéterminée au sein du milieu duquel ils sont extraits (Pantazidou et *al.*, 2009; USEPA et USACE, 2004 ; Klapper, 2003). Cette méthode permet de concentrer l'ensemble des sédiments contaminés en une seule zone où les efforts de gestion des sédiments contaminés peuvent être concentrés. Les impacts négatifs sur la communauté benthique sont d'ailleurs moins importants sur les zones de rejet en eaux libres en comparaison avec les zones de dragage. Toutefois, La vitesse de recolonisation est fonction de l'épaisseur du rejet en eaux libres (Environnement Canada, 1994).

Le dragage mécanique et le dragage hydraulique à succion sont deux procédés qui ont été testés dans le volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Les phases issues du dragage ont été séparées par polymérisation et filtration des boues pompées dans le cas du dragage hydraulique à succion et par décantation dans le cas du dragage mécanique. Noter que l'hydrocyclone a aussi été testé pour la séparation des phases issues du dragage mécanique mais n'a pas donné de résultats concluants. Globalement, de meilleurs résultats ont été obtenus avec le dragage hydraulique à succion en comparaison avec le dragage mécanique pour les sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

### 2.4.4 Les autres stratégies pour la gestion des sédiments contaminés

Les méthodes présentées ci-dessous n'ont pas été testées dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. En conséquence et en accord avec l'objectif 1 de ce projet de maîtrise, elles ne peuvent être retenues pour la construction de scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Néanmoins, il s'agit de méthodes retrouvées dans la littérature qui doivent tout de même être abordées afin d'avoir une vue d'ensemble des moyens disponibles pour procéder à la décontamination d'un lac eutrophe. Les procédés présentés dans cette section ciblent davantage la gestion *in situ* du phosphore dans l'eau plutôt que la gestion des contaminants emprisonnés dans les sédiments. Or, le lac Saint-Augustin est de type artésien (Galvez-Cloutier et *al.*, 2006 ; Pérez-Arzola et *al.*, 2006) et les contaminants se retrouvent dans la colonne d'eau par relargage. Une action directement sur les sédiments est donc essentielle afin de contrôler le principal apport interne en phosphore qui contribue à l'eutrophisation du lac. Pour cette raison, les procédés présentés dans cette section n'ont pas été retenus pour la construction de scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

Enfin, la plupart des procédés présentés dans cette section ont fait l'objet d'une étude théorique concernant leur éventuelle applicabilité au lac Saint-Augustin. Il ressort de cette étude que les procédés présentés ci-dessous sont plus difficilement applicables en général que les procédés choisis pour la construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés dans ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

### *Aération de l'hypolimnion*

Cette technique repose sur l'injection d'air au niveau de l'hypolimnion afin de créer des conditions aérobies à l'interface eau-sédiment sans pour autant perturber la thermocline (Ryding and Rast, 1994). L'idée générale derrière cette méthode est liée au fait que les conditions oxydantes favorisent davantage la rétention des métaux lourds et du phosphore dans les sédiments par rapport aux conditions réductrices (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Penn et *al.*, 2000 ; Sondergaard et *al.*, 2003). Cette méthode est peu dispendieuse et efficace à court terme mais n'empêche pas le retour des conditions favorisant le relargage des contaminants. De plus, cette méthode est difficilement applicable au lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Enfin, cette méthode peut occasionner des odeurs désagréables pour les riverains (Ryding and Rast, 1994).

### *Bris de la thermocline par circulation intense*

Cette méthode est en fait une variante de l'aération de l'hypolimnion, à l'exception que l'injection d'air se fait à un débit suffisant pour détruire la thermocline responsable de la stratification des eaux d'un lac en été. Une fois la thermocline brisée, l'aération peut être arrêtée et les algues peuvent sédimenter vers l'hypolimnion et ainsi être privée de la lumière essentielle à leur croissance. Ce brassage intensif des eaux a pour conséquence la remise en suspension des sédiments, ce qui réduit la pénétration de la lumière dans l'eau tout en créant des conditions propices au relargage des contaminants. De plus, des odeurs désagréables peuvent survenir et être très incommodantes pour les riverains (Ryding and Rast, 1994). Cette technique a pour avantage d'augmenter la charge nutritive à l'exutoire du lac par le mélange des eaux de l'hypolimnion très chargées avec le reste de la colonne d'eau, ce qui pose toutefois le risque de déplacer le problème en aval (Klapper, 2003).

### *Évacuation sélective des eaux hypolimniques*

Les eaux hypolimniques sont très chargées en matières nutritives, en particulier si les conditions physico-chimiques sont propices au relargage du phosphore à l'interface eau-sédiment, comme c'est généralement le cas pour les lacs eutrophes (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a; Penn et *al.*, 2000 ; Sondergaard et *al.*, 2003). Les eaux de l'hypolimnion riches en matières nutritives peuvent être utilisées comme engrais sur des terres agricoles avoisinantes (Klapper, 2003). L'idée derrière cette méthode est d'appauvrir la teneur

nutritive globale du système lacustre, ce qui a pour effet de limiter la production primaire. Cette solution n'est envisageable que pour des petits lacs stratifiés peu profonds puisque le volume d'eau à extraire peut être considérable (Ryding and Rast, 1994). Cette méthode est peu dispendieuse et efficace à court terme mais n'empêche pas le retour des conditions favorisant le relargage des contaminants. Cette méthode est difficilement applicable au lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

***Diminution du temps de rétention hydraulique***

Le temps de rétention hydraulique des eaux d'un lac peut être diminué par l'injection massive d'eaux ayant une faible charge nutritive, ce qui a pour impact d'augmenter le débit de même que la charge nutritive à l'exutoire. Bien que cette méthode nécessite des quantités très importantes d'eaux de chasse, l'effet de dilution des nutriments et la réduction des populations algales qui en découlent sont immédiats. En effet, lorsque le taux de croissance des algues est inférieur au taux de renouvellement des eaux, celles-ci n'atteignent pas le stade de la maturité et n'ont pas le temps de devenir nuisibles (Ryding and Rast, 1994). Aussi, l'introduction d'eaux oxygénées peut générer des conditions aérobies à l'interface eau-sédiment, ce qui favorise la rétention des métaux lourds et du phosphore et limite ainsi le relargage. Néanmoins, l'efficacité de cette méthode à long terme est discutable puisque le prochain épisode anoxique favorisera de nouveau le relargage des contaminants (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000). Aussi, la diminution du temps de rétention hydraulique d'un lac par l'augmentation des débits tributaires et exutoires peut causer des problèmes d'érosion en aval (Brière, 2006). Encore une fois, cette méthode est difficilement applicable au cas du lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

***Contrôle interne de la biodiversité***

Une première méthode de contrôle interne de la biodiversité repose sur l'introduction d'espèces étrangères au lac pour contrôler les populations algales ou certaines composantes taxinomiques sélectionnées du système lacustre. Toutefois, il est important de bien connaître la biodiversité du milieu ainsi que les propriétés des espèces étrangères implantées puisque l'équilibre écologique de tels systèmes est fragile et peut être sévèrement perturbé (Ryding and Rast, 1994).

Les populations de plantes aquatiques nuisibles peuvent également être contrôlées par l'ajout d'algicides. Ces produits sont souvent à base de cuivre et permette l'élimination des algues nuisibles du plan d'eau. Par contre, les coûts sont élevés, les résultats sont temporaires et la possibilité d'une intoxication des organismes saints n'est pas à exclure (Ryding and Rast, 1994). De plus, si les sédiments sont déjà contaminés en cuivre, l'ajout d'algicide contribue à aggraver l'étendue de la contamination. Aussi, le problème de relargage des contaminants provenant des sédiments n'est pas réglé selon cette méthode. Enfin, la destruction et la décomposition de grandes quantité d'algues peut perturber l'équilibre en oxygène de l'hypolimnion en créant des conditions anoxiques et réductrices qui favorisent le relargage du phosphore et des métaux lourds (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a ; Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000).

## 2.5 L'aide à la décision en environnement

Les outils disponibles pour une prise de décision meilleure font intervenir deux disciplines distinctes : la psychologie du jugement et de la prise de décision d'une part et les mathématiques et statistiques d'autre part. Plus spécifiquement, l'un étudie les processus mentaux sous-jacents à l'œuvre lorsqu'il y a prise de décision alors que l'autre utilise des nombres et des théories afin d'évaluer, de quantifier et de hiérarchiser les performances des différentes options pour en arriver à une prise de décision plus éclairée. Les décisions réunissant une pluralité d'objectifs à optimiser peuvent rapidement devenir complexes et causer des maux de têtes pour les décideurs qui doivent répondre de leurs actes. Des compromis sont d'ailleurs souvent inévitables entre les nombreux facteurs qui composent la décision à prendre. Heureusement, plusieurs outils d'aide à la décision ont été développés afin de soutenir les décideurs dans cette tâche (Virine and Trumper, 2008 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Guitouni and Martel, 1998).

De plus en plus, les projets environnementaux au sens large font intervenir des technologies de pointe complexes et dispendieuses qui intègrent des connaissances issues de nombreux domaines hautement spécialisés. Une bonne communication entre les experts impliqués est donc primordiale pour mener à terme de tels projets. En outre, la participation active du public et des parties prenantes impliquées et touchées par les retombées d'un projet

environnemental est essentielle au processus décisionnel et doit être encouragée au maximum (Sparrevik et *al.*,2011 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Lahdelma et *al.*, 2000). Plusieurs méthodes sont d'ailleurs disponibles dans la littérature afin d'accroître le niveau de participation des différents acteurs impliqués et touchés par les retombées d'un projet environnemental (André et *al.*, 2010 ; IETC, 1999 ; Heathcote, 1998).

À ce stade, une mise en garde importante s'impose. Comme le nom l'indique, les outils d'aide à la décision ont pour mandat d'aider un éventuel décideur dans la prise de décision. En conséquence, ces outils ne doivent pas être utilisés comme une boîte noire qui révèle de façon définitive et absolue la meilleure décision à prendre. Autrement, le processus décisionnel se résume en 8 étapes qu'il convient de réaliser dans l'ordre (André et *al.*, 2010) :

1. définition du projet à accomplir ;
2. réflexion sur les buts et objectifs de ce projet ;
3. collecte et analyse des données ;
4. détermination des différentes possibilités au respect des données recueillies et analysées ;
5. élaboration et évaluation des différentes options possibles ;
6. prise de la décision ;
7. application de la décision ;
8. contrôle et suivi ;

### 2.5.1 Les méthodes multicritères d'aide à la décision disponibles

Parmi les outils d'aide à la décision disponibles dans la littérature, les méthodes multicritères d'aide à la décision ont vu leur popularité considérablement augmenter au cours des dernières années dans les projets environnementaux (Huang et *al.*, 2011). Les méthodes multicritères d'aide à la décision se divisent à leur tour en différentes catégories et comprennent les méthodes avec un critère de synthèse, les méthodes de surclassement et les méthodes de rang (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; André et *al.*, 2010 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Guitouni and Martel, 1998). Les méthodes multicritères ont l'avantage de pouvoir

comparer différentes variantes sur la base d'un ensemble de critères et de sous-critères choisis conjointement et aident à la synthèse de l'information.

De plus, afin d'accroître la robustesse d'un processus décisionnel entrepris dans le cadre d'une analyse multicritères, il est avisé d'utiliser plusieurs méthodes multicritères d'aide à la décision (Alvarez-Guerra et *al.*, 2009). Pour cette raison et en accord avec l'objectif spécifique 4 de ce projet de maîtrise, deux méthodes multicritères d'aide à la décision sont sélectionnées parmi les méthodes présentées ci-dessous. Bien entendu, la mesure de la robustesse des options à confronter les unes aux autres à travers un processus décisionnel ne se limite pas uniquement à l'utilisation de deux méthodes multicritères d'aide à la décision. Toutefois, les méthodes multicritères étant ici utilisées comme outils afin de répondre au but de ce projet de maîtrise, la comparaison des résultats de deux méthodes multicritères a été jugé suffisante pour obtenir une première appréciation de la robustesse des options à confronter les unes aux autres.

#### *2.5.1.1 Les méthodes avec un critère de synthèse (Single Synthesizing Criteria Methods)*

Les méthodes avec un critère de synthèse ont pour particularité d'utiliser des valeurs numériques afin de faire ressortir un score de performance global pour chacune des options confrontées les unes aux autres sur une même échelle. Selon ces méthodes, chaque option évaluée se voit au final attribuer un score numérique représentatif de sa performance globale par rapport aux autres options. L'équation suivante résume le fonctionnement des méthodes avec un critère de synthèse, où l'alternative $a_i$ se voit attribuer un score de performance global $g(a_i)$ qui synthétise les scores de cette alternative sur n sous-critères $[g_1(a_i), g_2(a_i), \ldots, g_n(a_i)]$ à l'aide d'une méthode multicritères V (André et *al.*, 2010 ; Guitouni and Martel, 1998).

$$g(a_i) = V\,[g_1(a_i), g_2(a_i), \ldots, g_n(a_i)]$$

Deux méthodes de ce type sont couramment utilisées dans les projets environnementaux au sens large et incluent la méthode hiérarchique multicritères (Saaty) et la méthode *Multi-attribute Utility Theory (MAUT)* (Huang et *al.*, 2011 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Guitouni and Martel, 1998).

### Méthode hiérarchique multicritères

La méthode hiérarchique multicritères a été développée par Thomas L. Saaty et structure les différentes composantes de la décision selon une hiérarchie composée de différents niveaux (critères, sous-critères, scénarios). Une comparaison binaire des éléments appartenant à chacun des niveaux de la hiérarchie est d'abord effectuée. Les résultats préliminaires issus de cette comparaison sont compilés dans une matrice de comparaison pour chacun des niveaux de la hiérarchie. Un vecteur de priorité globale qui normalise à l'unité la somme des scores de performance numériques obtenus par chacun des scénarios est alors calculé (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Pohekar and Ramachandran, 2003 ; Saaty, 1984).

Les avantages de cette méthode incluent sa capacité à structurer un problème complexe sous la forme d'une hiérarchie, sa cohérence logique, sa flexibilité face à l'ajout de scénarios ou de nouveaux critères et la possibilité de procéder très facilement à des analyses de sensibilité sur les différents niveaux de la hiérarchie. De plus, le résultat de l'évaluation de chaque scénario est exprimé selon un chiffre adimensionnel, ce qui facilite la comparaison des scores de performance entre les scénarios. Le nombre de critères et de sous-critères n'est d'ailleurs pas limité dans la méthode hiérarchique multicritères. Cette méthode est facilement programmable dans Excel et est également disponible sur support informatique (logiciel *Expert Choice*). Par contre, la complexité de la méthode rend sa compréhension peu accessible au public qui n'a d'autre choix que de faire confiance aux experts du domaine, ce qui augmente les coûts (Huang et *al.*, 2011 ; Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 1998 ; Guitouni and Martel, 1998).

#### *Multi-Attribute Utility Theory*

Dans sa forme la plus simple sans structure hiérarchique, la méthode *Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)* transforme la performance de chaque alternative à travers une fonction utile synthèse $U=\Sigma_i\ w_i \times u_i$, où $w_i$ correspond au poids du critère i et $u_i$ est une fonction utile dont le résultat est compris entre 0 et 1 qui reflète la performance de l'alternative par rapport au critère i. L'alternative qui maximise la valeur obtenue par la fonction utile est préférée aux autres.

Il s'agit d'une méthode passablement simple qui octroie une certaine souplesse à l'utilisateur et lui permet d'apprécier la robustesse de ses alternatives à travers une analyse de sensibilité sur les poids des critères. Par contre, cette méthode se base sur la connaissance parfaite que l'utilisateur a des alternatives qu'il confronte les unes aux autres sur chacun des critères de la décision. De plus, cette méthode se fonde sur l'hypothèse que l'utilisateur est parfaitement consistant et cohérent dans l'évaluation du paramètre $u_i$ d'une alternative à l'autre. Enfin, l'évaluation du paramètre $u_i$ pour chacune des alternatives est difficile et peut représenter une source d'erreurs importante. Plusieurs techniques sont toutefois disponibles afin de créer des modèles de type MAUT plus sophistiqués (Huang et *al.*, 2011 ; Teixeira de Almeida, 2007 ; Kiker et *al*, 2005).

#### *2.5.1.2 Les méthodes de surclassement*

Les méthodes de surclassement définissent des seuils qui sont utilisés pour indiquer si une alternative en surclasse une autre pour chacun des critères. Les méthodes PROMETHEE (*Prefence Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*) et ÉLECTRE (ÉLimination Et Choix Traduisant la RÉalité) appartiennent à cette catégorie (Huang et *al.*, 2011 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Virine and Trumper, 2008). Ces deux méthodes ont été traduites sous la forme de logiciels qui requiert l'achat de licences pour leur utilisation. Les méthodes de surclassement sont particulièrement appropriées lorsque les unités des différents critères sont difficilement comparables, entre autres (Linkov et *al.*, 2005). La force principale de plusieurs méthodes de surclassement réside dans la possibilité d'éliminer dès le départ les scénarios qui performent très mal sur un critère. De cette manière, une bonne performance sur un ou plusieurs critère(s) ne peut pas compenser la mauvaise performance d'un scénario pour un critère (Linkov et *al.*, 2007).

**PROMETHEE**

La méthode PROMETHEE utilise le principe de surclassement pour classifier les différentes alternatives en les comparant deux par deux sur chacun des critères. Soient deux alternatives a et b, un nombre de critères égal à J, q' et p', respectivement pour les seuils d'indifférence et de préférence entre deux alternatives pour le critère j. Cette méthode utilise une fonction de préférence $P_j(a,b)$ qui est fonction de la distance $d_j$ séparant la performance de deux alternatives pour chaque critère. Dans cet exemple, les performances

des alternatives a et b pour le critère j sont notées f(a,j) et f(b,j). La fonction de préférence $P_j(a,b)$ pour le critère j est donnée par l'équation suivante :

$$P_j(a,b) = f(d_j) = f(f(a,j) - f(b,j))$$

Ainsi, deux alternatives sont insensibles à un critère si $d_j < q'$. Inversement, une alternative est préférée à une autre pour un critère si $d_j > p'$. L'indice de préférence multicritères entre deux alternatives $\pi(a,b)$ est une moyenne pondérée des fonctions de préférence sur J critères et se calcule au respect de l'équation suivante, où $w_j$ est le poids du critère j :

$$\pi(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^{J} w_j P_j(a,b)}{\sum_{j=1}^{J} w_j}$$

Des indices de surclassement sont alors calculés pour chacune des alternatives comparées deux à deux et la meilleure option correspond à celle qui surclasse majoritairement ses rivales (Pohekar and Ramachandran, 2003). Il en existe 4 versions pour la méthode PROMETHEE : PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE III et PROMETHEE IV (Singhe, 2010), et les deux premières disposent d'un logiciel qui facilite leur utilisation (Guitouni and Martel, 1998).

Cette méthode est passablement complexe et la détermination de seuils de préférence ou d'indifférence pour chaque critère peut s'avérer difficile, en particulier pour les cas où l'évaluation des critères se fait qualitativement. De plus, bien que cette méthode soit largement utilisée dans les projets environnementaux en général, les domaines où elle est appliquée concerne surtout la qualité de l'air et des émissions atmosphériques de même que la gestion des rebus et de l'énergie (Huang et *al.*, 2011). Cette méthode a toutefois l'avantage d'être disponible sur la forme de logiciels à interface facile tels que *Decision Lab* (Singhe, 2010).

**ÉLECTRE**

La méthode ÉLECTRE est une autre méthode de surclassement qui analyse les relations de dominance entre les différentes alternatives sur la base de critères définis. Plusieurs variantes de la méthode ÉLECTRE existent et comprennent ÉLECTRE I, ÉLECTRE II, ÉLECTRE III, ÉLECTRE IV, ÉLECTRE IS et ÉLECTRE TRI (Singhe, 2010 ; Guitouni

and Martel, 1998). La méthode ÉLECTRE I est une méthode selon laquelle les alternatives sont choisies si elles sont à la fois performantes sur la plupart des critères de la décision tout en n'excédant pas un seuil inacceptable de non-performance pour l'un des critères. Le problème est ainsi posé en termes de choix de la meilleure action à travers des relations de type « d'accord/pas d'accord ». La méthode IS est une variante d'ÉLECTRE I qui introduit des seuils d'indifférence pour chacun des critères. La méthode ÉLECTRE II classe d'abord les différentes alternatives de la meilleure à la pire dans un pré-ordre partiel ou total à l'intérieur duquel deux relations de surclassement (faible et forte) sont construites. La méthode ÉLECTRE III classe aussi les alternatives de la même manière qu'ÉLECTRE II et introduit des indices de concordance et de discordance pour chacun des critères. Une relation de surclassement est ensuite construite et prend appui sur ces indices. Il y a surclassement d'une option par rapport à une autre sur un critère si les tests de concordance et de discordance sont satisfaits à la fois. Des graphiques illustrant la relation de surclassement pour un critère et pour chaque couple d'alternatives peuvent alors être générés, et des itérations sont effectuées pour obtenir le classement final des différentes alternatives confrontées les unes aux autres. La méthode ÉLECTRE IV est beaucoup plus simple d'utilisation qu'ÉLECTRE III et introduit une notion de pseudo-critères qui sont tous d'égale importance dans le processus décisionnel. Enfin, la méthode ÉLECTRE TRI est une variante d'ÉLECTRE III où les choix possibles sont d'abord classés dans des catégories prédéterminées et bornés par des choix de référence pour chacun des critères (Singhe, 2010 ; Teixeira de Almeida, 2007 ; Pohekar and Ramachandran, 2003 ; Guitouni and Martel, 1998).

Les variantes de la méthode ÉLECTRE ont l'avantage d'être disponibles tous disponibles sous la forme d'un logiciel, à l'exception d'ÉLECTRE II (Guitouni and Martel, 1998). De plus, la méthode ÉLECTRE en est une pouvant être visuelle dépendamment de la variante et a l'avantage de considérer à la fois des critères de nature quantitative et qualitative. Elle est également insensible aux échelles et s'applique facilement sur des critères de nature très différente de même que sur des alternatives pouvant être à priori difficilement comparables. Par contre, cette méthode n'est pas simple d'application et peut difficilement être utilisée lorsque plusieurs alternatives sont confrontées les unes aux autres sur la base de nombreux critères. Par ailleurs, elle peut donner des résultats douteux si l'information de départ est

insuffisante ou incomplète (Singhe, 2010 ; Pohekar and Ramachandran, 2003). Enfin, la méthode ÉLECTRE est moins utilisée que la méthode PROMETHEE dans les projets environnementaux en général. Toutefois, son utilisation dans les projets environnementaux est surtout orientée sur les projets de restauration et de gestion de la qualité de l'eau (Huang et *al.*, 2011).

#### *2.5.1.3 Les méthodes de rang*

Enfin, la méthode ordinale de Holmes appartient au groupe des méthodes de rang. Selon cette méthode, chaque alternative se voit attribuer un rang par sous-critère. Ce rang est déterminé en fonction de la performance de l'alternative sur chacun des sous-critères et de l'importance de ces sous-critères au sein de leur critère d'attache. Un inventaire des rangs obtenus par alternative est réalisé et permet d'identifier les alternatives qui se démarquent des autres pour chacun des critères.

Cette méthode a l'avantage d'être très simple et de bien se prêter à comparaison avec la méthode hiérarchique multicritères de Thomas Saaty. De plus, elle est facilement programmable dans Excel, ce qui permet d'éviter les coûts associés à l'achat de licences. Par contre, il est très difficile de quantifier l'écart entre les importances des critères entre eux au sein de la décision finale. Aussi, cette méthode peut sembler arbitraire puisque l'utilisateur est appelé à faire de nombreux choix au cours de son utilisation (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011). Enfin, l'ordonnancement des performances des variantes confrontées les unes aux autres avec cette méthode dépend très fortement des importances relatives données aux sous-critères de la décision (André et *al.*, 2010).

### 2.5.2 Les méthodes retenues pour application au cas du lac Saint-Augustin

Afin de proposer une solution pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin qui offre le meilleur compromis possible parmi des critères et des sous-critères bien définis, deux méthodes multicritères doivent être sélectionnées parmi les méthodes qui ont été présentées ci-dessus. Les deux méthodes retenues pour ce faire sont la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes et elles sont donc décrites en détails dans les sections qui suivent. Ces deux méthodes ont l'avantage d'être simples et sont facilement programmables dans Excel, ce qui limite les coûts liés à l'achat de licences.

La popularité de la méthode hiérarchique multicritères pour l'évaluation de scénarios de gestion dans le domaine environnemental a considérablement augmenté au cours de la dernière décennie, notamment en Europe, en Asie et en Amérique du Nord (Huang et *al.*, 2011). À titre indicatif, 16 pays de l'Union européenne utilisent fréquemment ces méthodes pour le choix de scénarios de gestion efficaces pour les terrains contaminés (Kiker et *al.*, 2005). De plus, les méthodes multicritères, notamment la méthode hiérarchique multicritères, ont été largement utilisées dans le monde pour aider au choix éclairé de scénarios de gestion des sédiments contaminés (Sparrevik et *al.*, 2011 ; Alvarez-Guerra et *al.*, 2009 ; Linkov et *al.*, 2006a ; Linkov et *al.*, 2006b ; Kiker et *al.*, 2005 ; Bortone et *al.*, 2004). Pour ces raisons et pour les nombreux avantages listés ci-dessus, la méthode hiérarchique multicritères a été sélectionnée comme premier outil afin de proposer un scénario pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

Bien que plusieurs méthodes multicritères puissent se prêter à comparaison avec la méthode hiérarchique multicritères, le choix de la méthode ordinale de Holmes se justifie d'abord par la comparaison facile et directe qu'il est possible de faire avec la méthode hiérarchique multicritères lorsque les poids des critères sont tous égaux dans la décision. Cet aspect d'ailleurs est repris et détaillé plus en profondeur dans la section 2.5.5. De plus, il s'agit d'une méthode simple qui est couramment utilisée dans les analyses de décisions environnementales (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011). Par ailleurs, la méthode ordinale de Holmes est une méthode de rang et appartient ainsi à une autre catégorie de méthodes multicritères d'aide à la décision que la méthode hiérarchique multicritères, ce qui donne une dimension additionnelle à l'analyse par la diversification des catégories de méthodes utilisées (Alvarez-Guerra et *al.*, 2009). Enfin, la méthode ordinale de Holmes possède l'immense avantage d'utiliser intégralement le même barème d'évaluation des scénarios sur les sous-critères de la décision que celui qui est déjà à construire pour la méthode hiérarchique multicritères. En d'autres mots, les étapes préliminaires à l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères sont donc valables aussi pour la méthode ordinale de Holmes, ce qui permet d'obtenir facilement et rapidement des résultats additionnels pour une autre méthode multicritères d'aide à la décision et favorise ainsi la comparaison de résultats entre deux méthodes.

### 2.5.3 Les étapes préliminaires aux méthodes multicritères d'aide à la décision

Les étapes préliminaires communes à l'utilisation des deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées incluent (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Sparrevik et *al.*, 2011 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Lahdelma et *al.*, 2000 ; Saaty, 1984):

1- définir le but poursuivi à travers l'utilisation de la méthode sélectionnée;
2- construire les scénarios;
3- définir les critères et les sous-critères de la décision;
4- déterminer les poids des critères et des sous-critères;
5- construire le barème d'évaluation des scénarios à l'aide des données disponibles;
6- évaluer les scénarios au respect du barème d'évaluation construit en 5 ;
7- utiliser les méthodes multicritères d'aide à la décision.

Pour ce projet de maîtrise, le but poursuivi à travers l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision est de proposer une solution pour la meilleure gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. De plus, les scénarios à construire doivent être orientés sur les zones les plus contaminées du lac Saint-Augustin et inclure les procédés testés dans les volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin.

Des critères technique, économique, environnemental et social sont fréquemment retenus dans les méthodes multicritères d'aide à la décision appliquées aux projets environnementaux (Sparrevik et *al.*, 2011 ; Alvarez-Guerra et *al.*, 2009 ; Kiker et *al.*, 2005). Suivant ces critères, une liste de sous-critères est ensuite définie et fixe les bases pour la construction d'un barème d'évaluation des scénarios sur chacun des sous-critères à l'aide des données disponibles. Bien sûr, les sous-critères peuvent changer d'un projet à l'autre et doivent être adaptés selon la nature du projet et ses enjeux. Quoi qu'il en soit, les critères et les sous-critères à définir doivent avoir une signification pertinente et unique au problème rencontré, une méthode d'évaluation[4], une unité d'évaluation quantitative ou qualitative et doivent être discriminants. Enfin, un critère doit être exhaustivement défini par ses sous-critères, i.e. que toutes les facettes du problème sont prises en compte par les

[4] Les critères et les sous-critères doivent être à maximiser ou à minimiser.

sous-critères définis par l'utilisateur (Baker, 2011 ; Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; André et *al.*, 2010).

Les critères et sous-critères n'ont pas nécessairement la même importance dans la décision globale et peuvent se voir attribuer des importances relatives différentes. Comme les projets environnementaux font intervenir une multitude d'acteurs issus de différents milieux et pouvant avoir des intérêts divergents, une analyse de sensibilité sur les poids des critères et des sous-critères peut être réalisée (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Sparrevik et *al.*, 2011 ; André et *al.*, 2010 ; Alvarez-Guerra et *al.*, 2009 ; Kiker et *al.*, 2005).

Une fois les sous-critères définis, un barème d'évaluation servant à évaluer chacun des scénarios à l'égard de chacun des sous-critères de la décision est construit. La justification de chaque composante du barème d'évaluation doit se fonder sur des données économiques, techniques, environnementales et sociales spécialement collectées et adaptées aux scénarios devant faire l'objet d'une décision (Lahdelma et *al.*, 2000). Une fois le barème d'évaluation complété, chaque scénario se voit attribuer un rang par sous-critère au respect des justifications données dans le barème d'évaluation pour chacun des rangs. Ces rangs sont généralement des valeurs entières comprises entre 1 et n, où 1 correspond au meilleur rang possible pour un sous-critère. Les rangs obtenus par sous-critère ont une influence plus ou moins grande sur les scores de performance finaux des scénarios en fonction des poids alloués aux critères et aux sous-critères de la décision. Enfin, deux scénarios peuvent avoir le même rang pour un sous-critère s'ils offrent le même niveau de performance (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Saaty, 1984). Les méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées peuvent alors être utilisées.

### 2.5.4 La méthode hiérarchique multicritères

La méthode hiérarchique multicritères développée par Thomas L. Saaty structure d'abord les différentes composantes d'une décision à l'image d'un arbre hiérarchique possédant plusieurs niveaux. Suivant cette hiérarchie, le niveau 1 représente l'objectif poursuivi à travers l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères : l'identification de la meilleure option. Les niveaux 2 et 3 représentent respectivement les critères et les sous-critères servant à évaluer chacun des scénarios confrontés les uns aux autres dans la

méthode hiérarchique multicritères. Enfin, le niveau 4 est alloué aux différents scénarios qu'il faut évaluer à l'égard des niveaux antérieurs (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Saaty, 1984). La figure 18 montre un exemple très simple d'arbre hiérarchique sur lequel apparaissent les différents niveaux de la hiérarchie définis ci-dessus. Selon cet exemple, trois critères sont définis et chacun se subdivise en trois sous-critères. Au total, trois scénarios sont confrontés les uns aux autres et sont à évaluer au respect des sous-critères et critères correspondants et appartenant aux niveaux antérieurs.

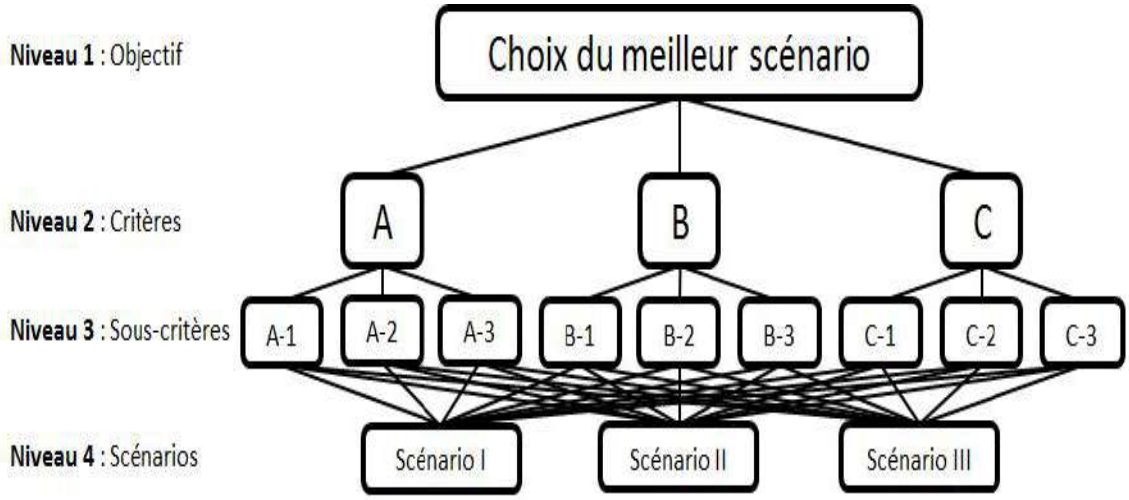


**Figure 18 : Exemple d'un arbre hiérarchique pour la méthode hiérarchique multicritères**

Dans la méthode hiérarchique multicritères, les critères et les sous-critères de la décision peuvent avoir des importances relatives différentes dans la décision finale. Autrement dit, le critère A de la figure 18 pourrait être plus important que B, et C pourrait être le moins important des critères dans la décision à prendre. Le même raisonnement s'applique au niveau des sous-critères : le sous-critère A-1 pourrait être plus important que A-2, et A-3 pourrait avoir la même importance que A-2, par exemple. Afin de déterminer les importances relatives des constituants de chaque niveau, ceux-ci doivent être systématiquement comparés un à un par paires et à tour de rôle (Huang et *al.*, 2011 ; Linkov et *al.*, 2006a ; Saaty, 1984). Le tableau 11 montre la définition des importances relatives à utiliser lorsque deux composantes d'un même niveau sont comparées. Il s'agit donc d'une échelle sémantique à utiliser pour la comparaison par paires de tous les éléments appartenant aux différents niveaux de la hiérarchie définis à la figure 18.

**Tableau 11: Définitions des importances relatives pour la comparaison des composantes de chaque niveau (échelle sémantique de Thomas Saaty)**

| Importances relatives | Définition |
|---|---|
| **1** | Importance égale des deux éléments |
| **3** | Faible importance d'un élément par rapport à l'autre |
| **5** | Importance déterminante d'un élément par rapport à l'autre |
| **7** | Importance élevée d'un élément par rapport à l'autre |
| **9** | Importance très élevée d'un élément par rapport à l'autre |
| **2, 4, 6, 8** | Valeurs intermédiaires entre deux définitions voisines |

Reprenons l'exemple défini ci-dessus pour le cas des critères de la figure 18, où A est plus important que B et où C est le moins important des critères dans la décision à prendre. Suivant la nomenclature du tableau 11, le critère A est faiblement plus important que le critère B et possède une importance déterminante par rapport au critère C. Le critère B est faiblement plus important que le critère C. Par rapport au critère A et toujours au respect du tableau 11, cela se traduit par l'expression A = 3B = 5C. En comparant les composantes de ce niveau par paire et en utilisant des systèmes d'équations, on obtient : A = 3B, A = 5C et 3B = 5C (B = 5/3C). Or, un critère B faiblement plus important que le critère C se traduit aussi par l'expression B = 3C.

L'utilisateur doit donc faire preuve d'un maximum de prudence afin d'éviter les incohérences qui peuvent surgir de la comparaison par paires. Pour ce faire, l'utilisation de systèmes d'équations est fortement conseillée (Rodriguez-Mendez, 2003). L'utilisateur peut toutefois choisir de comparer les composantes de chaque niveau par paires et de vérifier la cohérence de ses choix par une méthode logique mathématique. À ce sujet, Saaty propose une méthode afin de vérifier la cohérence des éléments de chaque niveau de la structure hiérarchique. Le lecteur est invité à s'y référer pour plus de détails (Saaty, 1984).

À partir des importances relatives ainsi déterminées pour les composantes de chacun des niveaux de l'arbre hiérarchique, des poids doivent être déterminés. Ceux-ci sont déterminés logiquement de manière à ce que la somme des poids des constituants appartenant à chacun des niveaux de la hiérarchie égale l'unité. La figure 19 illustre la méthodologie à suivre

pour l'obtention des poids des constituants de chacun des niveaux à partir des importances relatives définies pour ces constituants (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Saaty, 1984).

| | Partie 1 | | | Partie 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Critères | A | B | C | A | B | C | Σ | PC=Σ/n |
| A | 1 | $a_{1,2}$ | $a_{1,3}$ | $1/\Sigma a_{i,1}$ | $\frac{a_{1,2}}{\Sigma a_{i,2}}$ | $\frac{a_{1,3}}{\Sigma a_{i,3}}$ | $b_1$ | $b_1/n$ |
| B | $1/a_{1,2}$ | 1 | $a_{2,3}$ | $\frac{[1/a_{1,2}]}{\Sigma a_{i,1}}$ | $1/\Sigma a_{i,2}$ | $\frac{a_{2,3}}{\Sigma a_{i,3}}$ | $b_2$ | $b_2/n$ |
| C | $1/a_{1,3}$ | $1/a_{2,3}$ | 1 | $\frac{[1/a_{1,3}]}{\Sigma a_{i,1}}$ | $\frac{[1/a_{2,3}]}{\Sigma a_{i,2}}$ | $1/\Sigma a_{i,3}$ | $b_3$ | $b_3/n$ |
| Σ | $\Sigma a_{i,1}$ | $\Sigma a_{i,2}$ | $\Sigma a_{i,3}$ | 1 | 1 | 1 | n | 1 |

**Figure 19: Méthodologie à suivre pour la détermination des poids des composantes de chaque niveau**

La figure 20 illustre cette fois l'exemple donné ci-dessus pour le calcul des poids des critères de la figure 18 à partir des importances relatives définies pour les composantes de ce niveau dans l'exemple. Selon cet exemple, les critères A, B et C contribuent respectivement pour 65%, 22% et 13% de la décision finale, pour un total de 100%.

| | Partie 1 | | | Partie 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Critères | A | B | C | A | B | C | Σ | PC=Σ/n |
| A | 1 | 3 | 5 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 1,95 | 0,65 |
| B | 1/3 | 1 | 5/3 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,66 | 0,22 |
| C | 1/5 | 3/5 | 1 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,39 | 0,13 |
| Σ | 1,53 | 4,60 | 7,67 | 1 | 1 | 1 | n | 1 |

**Figure 20 : Calcul des poids des critères pour l'exemple donné à partir de la figure 18**

Sur les figures 19 et 20, les valeurs inverses retrouvées de part et d'autre de la diagonale de la partie 1 représentent un signe de cohérence : un critère A étant trois fois plus important qu'un critère B équivaut à dire que le critère B a trois fois moins d'importance que le critère A (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Saaty, 1984). De plus, l'exemple de la figure 20 est donné pour le cas où les importances relatives des critères sont déterminées à l'aide de systèmes d'équations. Les valeurs identiques retrouvées sur chaque ligne de la partie 2 sur la figure 20 sont signe de cohérence parfaite (Rodriguez-Mendez, 2003).

Plusieurs tableaux similaires à celui de la figure 19 sont systématiquement construits pour chaque niveau de la hiérarchie défini à la figure 18. D'abord, il y a un tableau regroupant l'ensemble des critères de manière à ce que la somme des poids des critères soit 100%. C'est d'ailleurs l'exemple qui est donné ci-dessus. Ensuite, il y a un tableau de ce genre par critère regroupant l'ensemble de ses sous-critères de manière à ce que la somme des poids des sous-critères au sein de chaque critère soit 100%. Enfin, il y a un tableau de ce genre par sous-critère qui regroupe l'ensemble des scénarios de manière à ce que la somme des poids de performances obtenus par les différents scénarios confrontés les uns aux autres pour chaque sous-critère soit 100%. À propos, les poids de performance par sous-critère pour chacun des scénarios sont obtenus à partir de l'évaluation de ces scénarios au respect d'un barème d'évaluation à définir pour chacun des sous-critères de la décision. Le résultat de l'évaluation des scénarios à l'égard du barème d'évaluation doit d'abord être traduit sur l'échelle sémantique du tableau 11 pour pouvoir dériver les poids de performance de chaque scénario à l'égard de chaque sous-critère de la décision (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Rodriguez-Mendez, 2003).

Tout est alors en place pour le calcul du vecteur de priorité global qui représente le score de performance pour chacun des scénarios en fonction des importances relatives initialement définies pour les critères et les sous-critères de la décision (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Saaty, 1984).

Jusqu'ici, "m" critères et "$n_i$" sous-critères ont été définis pour chacun des critères de la décision. Le vecteur de priorité global pour le scénario k se calcule comme suit :

$$Perf_k = \sum_{i=1}^{m} \left[ \sum_{j=1}^{n_i} \left[ PC_i \times PSC_{j_i} \times RE_{k_{j_i}} \right] \right]$$

Dans cette équation, $PC_i$ représente le poids alloué au critère i. Le poids du sous-critère j par rapport au critère i est noté $PSC_{ji}$ et le poids de performance du scénario k par rapport au sous-critère j est noté $RE_{kji}$. En d'autres mots, les poids de performance des scénarios sont multipliés par les valeurs correspondantes du niveau supérieur (sous-critères) et ainsi de suite jusqu'au premier niveau (critère). Le tout est sommé pour chaque scénario et la valeur de cette somme donne le vecteur de priorité globale regroupant les scores de

performances obtenus pour chacun des scénarios. La meilleure option est celle qui maximise la valeur de sommation au sein du vecteur de priorité global (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Pohekar and Ramachandran, 2003 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 1998; Saaty, 1984).

À ce stade, il faut mentionner que la méthode hiérarchique multicritères est affublée de petits défauts méthodologiques et il est avisé d'en connaître l'existence avant de l'utiliser. En effet, la méthode hiérarchique multicritères telle que développée par Thomas Saaty fonctionne sur le principe de composition hiérarchique. Suivant ce principe, les poids attribués aux composantes des niveaux supérieurs de la structure hiérarchique sont déterminés indépendamment des niveaux inférieurs. Certains auteurs ont démontré que lorsque ce principe est respecté, une inversion des scores de performance par scénario peut survenir dans le cas spécifique où l'utilisateur ajoute ou enlève un scénario trop similaire à un autre en cours d'analyse sans réviser les poids attribués aux composantes des niveaux supérieurs de la hiérarchie. Il est donc illogique pour ces auteurs de définir les poids des critères et des sous-critères sans tenir compte des différentes alternatives confrontées les unes aux autres à travers un processus décisionnel (Dyer, 1990 ; Schoner and Wedley, 1989). En d'autres mots et en référence à la figure 18, l'ajout d'un scénario IV trop similaire au scénario II (par exemple) pourrait entraîner une inversion des scores de performances si les poids des composantes des niveaux supérieurs (critères et sous-critères) ne sont pas révisés en conséquence de l'ajout de ce scénario (IV). Toutefois et dans le cadre de ce projet de maîtrise, la méthode hiérarchique multicritères est utilisée comme outils afin d'identifier la meilleure solution pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin parmi des scénarios suffisamment différents les uns des autres et dont le nombre est fixé dès le départ et ne variera pas en cours d'analyse.

Un des avantages de la méthode hiérarchique multicritères est lié à la possibilité de réaliser une analyse de sensibilité sur les poids des critères et/ou des sous-critères de la décision. Pour ce faire, l'utilisateur n'a qu'à changer les importances relatives des constituants du niveau où il désire réaliser une analyse de sensibilité. De nouveaux poids sont alors calculés et le vecteur de priorité globale qui hiérarchise les scénarios selon leur performance est modifié en conséquence de ces changements. La robustesse des scénarios peut alors être

qualitativement appréciée et les paramètres qui influencent la décision au sein de l'analyse multicritères peuvent être identifiés (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011). Les autres avantages de cette méthode ont déjà été décrits dans la section 2.5.1.

### 2.5.5 La méthode ordinale de Holmes

La méthode ordinale de Holmes est une méthode de rang qui se prête très bien à comparaison avec la méthode hiérarchique multicritères de Thomas Saaty. Dans la méthode ordinale de Holmes, tous les critères ont une importance égale les uns par rapport aux autres dans la décision finale. Cependant, les importances relatives attribuées aux sous-critères peuvent être variables selon qu'ils occupent une importance plus ou moins grande au sein de leur critère d'attache. Une comparaison est donc possible avec la méthode hiérarchique multicritères pour le cas où tous les critères ont la même importance dans la décision finale. Toutefois, les importances relatives de chaque sous-critère au sein de leur critère d'attache ne doivent pas changer d'une méthode à l'autre pour qu'une comparaison entre la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes puisse avoir lieu.

De plus, la méthode ordinale de Holmes utilise exactement le même barème d'évaluation que la méthode hiérarchique multicritères pour l'évaluation des scénarios à l'égard de chacun des sous-critères. Suivant ce barème, un rang de performance est attribué à chaque scénario pour chacun des sous-critères. Un rang pondéré combinant l'importance du sous-critère au sein de son critère d'attache (classement) et la performance du scénario pour ce sous-critère au respect d'un barème d'évaluation (rang) doit ensuite être déterminé à l'aide de la figure 21 qui schématise la procédure à suivre pour ce faire (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; André et *al.*, 2010).

| | Rang | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Classement** | **1** | **2** | **3** | **4** |
| **1** | 1 | 2 | 3 | 4 |
| **2** | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **3** | 3 | 4 | 5 | 6 |
| **4** | 4 | 5 | 6 | 7 |

**Figure 21: Matrice des rangs pondérés (Tiré de Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011)**

Par exemple sur la figure 21, un scénario (hypothétique) qui offre un niveau de performance (rang) de 2 pour un sous-critère ayant une importance relative (classement) de 3 par rapport à ses congénères se verrait attribuer un rang pondéré de 4. De cette manière, l'utilisateur détermine le rang pondéré de chacun des scénarios pour chacun des sous-critères de la décision.

La méthodologie s'effectue un critère à la fois et les rangs pondérés obtenus pour chacun des sous-critères d'attache au critère évalué sont comptabilisés dans un tableau récapitulatif. Au total, il y a donc autant de tableaux récapitulatifs qu'il y a de critères dans la décision. Pour chacun des critères, les rangs pondérés sont comptabilisés (nombre de premières places, de secondes places, etc.), ce qui permet d'ordonner les scénarios pour chacun des critères. Le meilleur scénario pour un critère donné correspond à celui qui possède le plus grand nombre de premières places, de deuxièmes places, et ainsi de suite (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011).

La figure 22 illustre un exemple de tableau récapitulatif obtenu par la méthode ordinale de Holmes pour un critère spécifique A. Rappelons qu'il y a autant de tableaux de ce genre qu'il y a de critères définis dans la décision. Dans cet exemple d'application, trois sous-critères (A-1, A-2 et A-3) sont définis et quatre scénarios sont confrontés les uns aux autres. Les rangs pondérés sont obtenus à l'aide de la méthodologie présentée à la figure 21.

| Sous-critères | Classement | Scénarios | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | I | | II | | III | | IV | |
| | | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré |
| A-1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| A-2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| A-3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| Nombre de 1er | | 1 | | 0 | | 0 | | 1 | |
| Nombre de 2e | | 0 | | 2 | | 2 | | 0 | |
| Nombre de 3e | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | |
| Nombre de 4e | | 1 | | 0 | | 0 | | 1 | |
| Nombre de 5e | | 0 | | 1 | | 0 | | 0 | |
| **Classement final** | | **1** | | **3** | | **2** | | **1** | |

**Figure 22: Exemple d'application de la méthode ordinale de Holmes**

Selon l'exemple de la figure 22 et spécifiquement pour le critère hypothétique A, les scénarios I et IV sont les plus performants et arrivent ex-aequo. Le scénario III arrive en deuxième position, devant le scénario II à la dernière position pour ce critère.

La méthode se répète ainsi pour chacun des critères et un tableau global qui reprend la comptabilisation des rangs pondérés en considérant l'ensemble des critères est généré. Les scénarios peuvent alors être ordonnés selon leur performance globale. En plus des avantages listés à la section 2.5.1 pour cette méthode, la méthode ordinale de Holmes permet de faire ressortir clairement les forces et les faiblesses de chaque scénario à l'étude à travers l'analyse par critère (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; André et *al.*, 2010).

À l'image de la méthode hiérarchique multicritères, la méthode ordinale de Holmes se prête également bien à une analyse de sensibilité. Toutefois, les importances (classement) allouées à chacun des critères étant égales dès le départ, l'analyse de sensibilité ne peut être réalisée que sur les importances (classement) des sous-critères de la décision. L'utilisateur peut donc créer différentes situations où le classement des sous-critères change d'une situation à l'autre. Un nouveau rang pondéré par sous-critère pour chaque scénario est alors déterminé au respect de la figure 21, ce qui affecte ainsi les résultats obtenus par l'utilisation de la méthode.

# Chapitre 3 Méthodologie et résultats préliminaires

La méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes sont les deux méthodes multicritères d'aide à la décision qui ont été sélectionnées comme outils afin d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. En accord avec l'objectif spécifique 1 de ce projet de maîtrise, les scénarios à construire pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin doivent être orientés sur les zones les plus contaminées et incorporer les procédés testés lors des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Ce chapitre présente d'abord la méthodologie suivie pour l'identification des zones les plus contaminées au lac Saint-Augustin. Une fois ces zones identifiées, différents scénarios pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin sont construits. Enfin, les critères et les sous-critères utilisés pour l'identification des scénarios les plus performants à travers l'utilisation des deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées sont définis et décrits en détails. L'arbre hiérarchique est alors construit et différentes situations à réaliser dans le cadre d'une analyse de sensibilité sont décrites et justifiées. Les deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées pour ce projet de maîtrise peuvent alors être programmées dans Excel et utilisées afin d'identifier les scénarios les plus performants sur la base de critères et de sous-critères préalablement définis.

## 3.1 L'identification des zones fortement contaminées

Les études de faisabilité technique et économique réalisées à ce jour pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin prennent en compte la totalité des sédiments du lac et présentent des coûts d'implantation très importants (Ville de Québec, 2009 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005). Afin de réduire les coûts d'implantation, les scénarios proposés dans le cadre de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin ciblent en particulier les zones les plus fortement contaminés.

Les sédiments du lac Saint-Augustin ont déjà fait l'objet de nombreuses campagnes de caractérisation dans le passé et les principaux contaminants ont pu être identifiés et quantifiés. Les principaux contaminants retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin

incluent le phosphore et certains métaux lourds. La figure 23 montre une carte du lac Saint-Augustin sur laquelle figurent les courbes bathymétriques de même que l'ensemble des sites où il y a eu échantillonnage et caractérisation des sédiments en phosphore et en métaux lourds. Les lettres A à I affublées d'un incrément numérique représentent les sites où il y a eu échantillonnage et caractérisation des sédiments sur un axe sud-nord lors de précédents travaux (Brin, 2007 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Dominguez, 2004 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003 ; Brin et Dominguez, 2002).

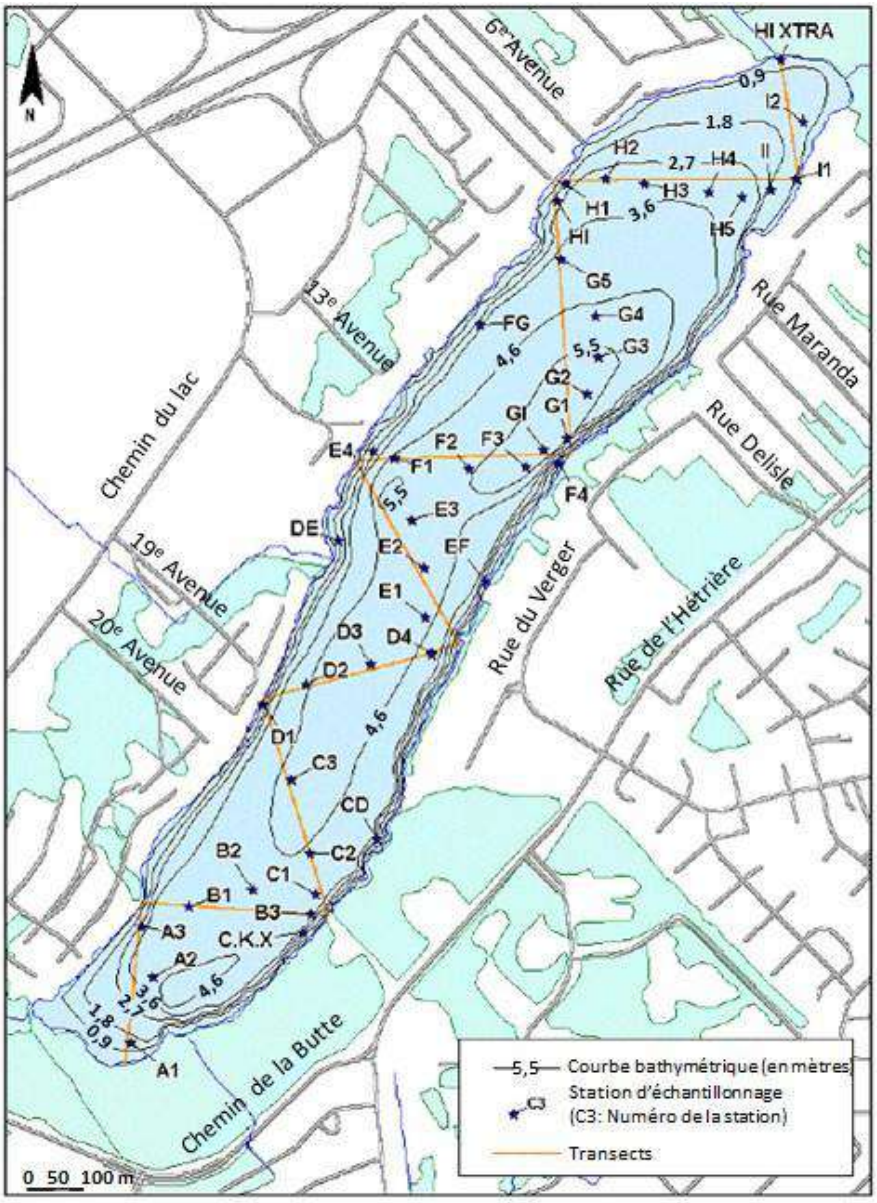


**Figure 23: Carte bathymétrique et sites d'échantillonnage au lac Saint-Augustin**

Les résultats issus de la caractérisation des sites illustrés à la figure 23 ont permis d'identifier quatre métaux lourds pour lesquels les concentrations retrouvées excèdent le seuil d'effet mineur (SEM) définis pour ces métaux par le Centre Saint-Laurent (1993) dans plus de 80% des cas. Il s'agit notamment du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc qui sont maintenant considérés comme étant des contaminants prioritaires à traiter (Dominguez, 2004 ; Galvez-Cloutier et *al*., 2003 ; Brin et Dominguez, 2002). Ces métaux lourds ont donc été retenus pour la délimitation des zones les plus contaminées du lac Saint-Augustin.

Les seuils d'effets mineurs (SEM) et néfastes (SEN) sont tirés d'un document qui a été publié conjointement par le Centre Saint-Laurent et le Ministère de l'Environnement du Québec en 1992 et qui s'intitule *Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent*. Depuis, ce document a été révisé et a donné naissance en 2007 au guide *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'applications : prévention, dragage et restauration*. La délimitation des zones fortement contaminées doit donc être réalisée à partir des seuils redéfis dans le guide de 2007. Dans ce guide, les seuils d'effets mineurs (SEM) et néfastes (SEN) ont été remplacés respectivement par la concentration seuil produisant un effet (CSE) et par la concentration produisant un effet probable (CEP) (Environnement Canada et MDDEP, 2007).

De plus, trois autres concentrations seuils ont été ajoutées afin d'aider à la prise de décision dans un contexte de gestion écoresponsable des contaminants. Il s'agit de la concentration d'effets rares (CER), de la concentration d'effets occasionnels (CEO) et de la concentration d'effets fréquents (CEF). Suivant ces concentrations seuils, les sédiments dragués peuvent être redéposés en eaux libres si les concentrations retrouvées pour chacun des contaminants sont inférieures à leur CEO respective. Si les concentrations retrouvées dans les sédiments sont supérieures à la CEO mais inférieures à la CEF, des analyses supplémentaires de toxicité sont requises. Dans le cas où les concentrations retrouvées dans les sédiments sont supérieures à la CEF, le dépôt des sédiments en eaux libres est carrément proscrit. Enfin, alors qu'un dépassement de la CEP justifie la pertinence d'entreprendre des études de faisabilité pour la restauration d'un site contaminé, le dépassement de la CEF indique que la restauration est souhaitable (Environnement Canada et MDDEP, 2007).

Pour la délimitation des zones fortement contaminées au lac Saint-Augustin, la concentration seuil utilisée est la CEP puisque le dépassement de cette valeur justifie la pertinence d'entreprendre des études de restauration. Le tableau 12 montre les concentrations seuils définies pour le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc dans les écosystèmes d'eau douce. À titre indicatif, une comparaison avec le SEM utilisé dans les études de caractérisation pour l'identification des quatre métaux lourds prioritaires au lac Saint-Augustin est effectuée.

**Tableau 12: Critères de qualité des sédiments d'eau douce**

| Éléments problématiques | Concentrations (mg/kg) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CER | CSE | CEO | CEP | CEF | SEM |
| Cadmium (Cd) | 0,33 | 0,60 | 1,7 | 3,5 | 12 | 0,9 |
| Cuivre (Cu) | 22 | 36 | 63 | 200 | 700 | 28 |
| Plomb (Pb) | 25 | 35 | 52 | 91 | 150 | 42 |
| Zinc (Zn) | 80 | 120 | 170 | 310 | 770 | 150 |
| Phosphore (P) | - | - | - | - | - | 600 |

* Les données présentées au tableau 12 proviennent du guide *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'applications : prévention, dragage et restauration.*

Pour le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc, les résultats issus de la caractérisation des sites de la figure 23 ont été comparés à la CEP respective de chacun de ces métaux afin de délimiter les zones fortement contaminées. À propos, un site qui dépasse la CEP pour l'un ou l'autre des quatre métaux prioritaires est considéré fortement contaminé en métaux lourds.

Néanmoins, les sédiments du lac Saint-Augustin sont aussi fortement contaminés par du phosphore qui se retrouve dans la colonne d'eau par relargage et accentue ainsi l'eutrophisation du lac (Brin, 2007 ; Parant, 2007 ; Dominguez, 2004). Or, le guide *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'applications : prévention, dragage et restauration* ne présente pas de concentrations seuils pour le phosphore total contenu dans les sédiments des écosystèmes d'eau douce (Environnement Canada et MDDEP, 2007). En conséquence, les seuils retenus pour la délimitation des zones fortement contaminées en phosphore total au lac Saint-Augustin sont les seuils d'effets mineurs (SEM) et d'effets néfastes (SEN) anciennement utilisés. Pour le phosphore

total, les valeurs de SEM et de SEN sont respectivement de 600 mg/kg et 2000 mg/kg de sédiments secs (Brin, 2007). Les résultats issus de la caractérisation des sites de la figure 23 affichent presque tous une concentration en phosphore total supérieure au SEM. De plus, les concentrations les plus élevées en phosphore total avoisinent 1200 mg/kg et ne dépassent donc jamais le SEN (Brin, 2007 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005).

Il faut rappeler ici que le SEN a été remplacé en 2007 par la concentration produisant un effet probable (CEP) et que c'est la CEP qui a été utilisée pour la délimitation des zones fortement contaminées en métaux lourds. Une concentration seuil pour le phosphore total doit donc être fixée. À propos, la valeur retenue pour déterminer les zones fortement contaminées en phosphore total est de 900 mg/kg, soit la valeur médiane entre le SEM et le maximum retrouvé dans les sédiments du lac. Ainsi, un site où la concentration retrouvée dépasse le seuil de 900 mg/kg est considéré fortement contaminé en phosphore.

Le tableau 13 montre le détail des concentrations obtenues en phosphore total, en cadmium, en cuivre, en plomb et en zinc pour chacun des sites d'échantillonnage de la figure 23 lors des précédentes études de caractérisation. Ces valeurs de concentration retrouvées pour chacun des sites ont été comparées aux seuils définis ci-dessus afin d'identifier les zones les plus fortement contaminées au lac Saint-Augustin (Brin, 2007 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Dominguez, 2004). Dans le tableau 13, les sites d'échantillonnage qui montrent des concentrations supérieures aux concentrations produisant un effet probable (CEP) définies ci-dessus pour chacun des contaminants sont identifiés en rouge. Les zones les plus fortement contaminées au lac Saint-Augustin sont donc constituées des sites d'échantillonnage qui excèdent ces concentrations seuils pour au moins un des contaminants.

**Tableau 13 : Comparaison des données de caractérisation aux seuils pour l'identification des zones fortement contaminées au lac Saint-Augustin**

| Échantillon | Dominguez, 2004 | | | | ProFaune, 2005 | Brin, 2007 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Concentration des métaux prioritaires mg/kg | | | | Concentration en phosphore total mg/kg | |
| | Cu | Pb | Cd | Zn | | |
| A1 | 31,0 | 40,0 | 2,0 | 160,0 | 688 | |
| A2 | 47,5 | 100,0 | 3,0 | 330,5 | 871 | 1200 |
| A3 | 38,0 | 85,0 | 2,0 | 290,5 | | |
| B1 | 45,0 | 100,0 | 3,0 | 340,0 | 816 | |
| B2 | 47,5 | 110,0 | 2,0 | 333,5 | | |
| B3 | 42,7 | 78,3 | 2,3 | 270,8 | | |
| CD | 28,0 | 40,0 | 4,0 | 105,0 | | 1300 |
| C1 | 40,0 | 80,0 | 2,0 | 262,5 | 1073 | |
| C2 | 43,5 | 100,0 | 3,0 | 320,5 | | |
| C3 | 45,0 | 90,0 | 2,0 | 309,0 | | |
| DE | 35,0 | 55,0 | 2,5 | 214,0 | 545 | |
| D1 | 26,0 | 50,0 | 2,0 | 172,0 | 861 | |
| D2 | 41,0 | 90,0 | 2,0 | 308,0 | | |
| D3 | 43,2 | 81,7 | 2,5 | 304,0 | 921 | |
| D4 | 37,5 | 90,0 | 2,0 | 289,5 | | |
| EF | 32,0 | 50,0 | 2,0 | 179,0 | | |
| E1 | 42,5 | 90,0 | 2,5 | 314,0 | 903 | |
| E2 | 43,0 | 85,0 | 3,0 | 326,0 | | |
| E3 | 43,0 | 90,0 | 3,0 | 341,0 | 1087 | |
| E4 | 33,5 | 60,0 | 3,5 | 233,5 | | 1100 |
| FG | 26,0 | 60,0 | 2,0 | 219,0 | 1142 | |
| F1 | 30,5 | 70,0 | 1,5 | 252,0 | 927 | |
| F2 | 46,0 | 100,0 | 3,0 | 360,2 | | 1275 |
| F3 | 49,5 | 95,0 | 2,0 | 320,5 | | |
| F4 | 38,0 | 50,0 | 1,0 | 196,0 | | |
| GI | 44,0 | 105,0 | 2,0 | 335,5 | | |
| G1 | 46,3 | 92,5 | 2,8 | 328,5 | 1043 | |
| G2 | 48,5 | 100,0 | 2,0 | 329,5 | | |
| G3 | 48,0 | 100,0 | 2,0 | 335,5 | | |
| G4 | 46,0 | 100,0 | 2,5 | 361,5 | 1150 | |
| G5 | 44,5 | 110,0 | 2,5 | 354,5 | | 1190 |
| HI | 22,8 | 20,0 | 2,0 | 139,2 | 914 | |
| HI XTRA | 11,0 | 10,0 | 1,5 | 73,5 | 488 | |
| H1 | 70,0 | 85,0 | 4,0 | 363,5 | | |
| H2 | 52,0 | 110,0 | 2,0 | 398,0 | | 1200 |
| H3 | 49,0 | 110,0 | 2,0 | 375,5 | | |
| H4 | 48,5 | 100,0 | 2,0 | 334,5 | | |
| H5 | 51,0 | 90,0 | 2,0 | 320,0 | | 912 |
| II | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 36,5 | | |
| I1 | 13,0 | 4,0 | 1,5 | 105,0 | | |
| I2 | 43,5 | 60,0 | 2,7 | 263,8 | | |
| C,K,X | 40,0 | 60,0 | 2,0 | 215,5 | | |
| **Concentration d'effet probable (CEP)** | **200** | **91** | **3,5** | **310** | **900**** | |

** Valeur médiane entre le SEM et le maximum retrouvé au lac Saint-Augustin.

Les zones à haute contamination en métaux lourds coïncident avec les zones fortement contaminées en phosphore, ce qui permet d'orienter les stratégies de gestion des sédiments contaminés en ces endroits stratégiques. La figure 24 montre quatre zones à haute contamination où les sédiments sont particulièrement contaminés en phosphore et en métaux lourds. Sur cette figure, les zones I et III recueillent l'eau provenant de l'autoroute et des zones agricoles situées au nord du lac. Les zones I, III et IV sont des zones à haute sédimentation puisqu'elles correspondent grosso modo à des points d'entrée pour les eaux de ruissellement. De plus, l'ancienne base d'hydravion responsable d'une partie des sources externes et maintenant contrôlées en métaux lourds était localisée au niveau de la zone III. La zone II est la zone la plus profonde du lac et comprend la fosse centrale.

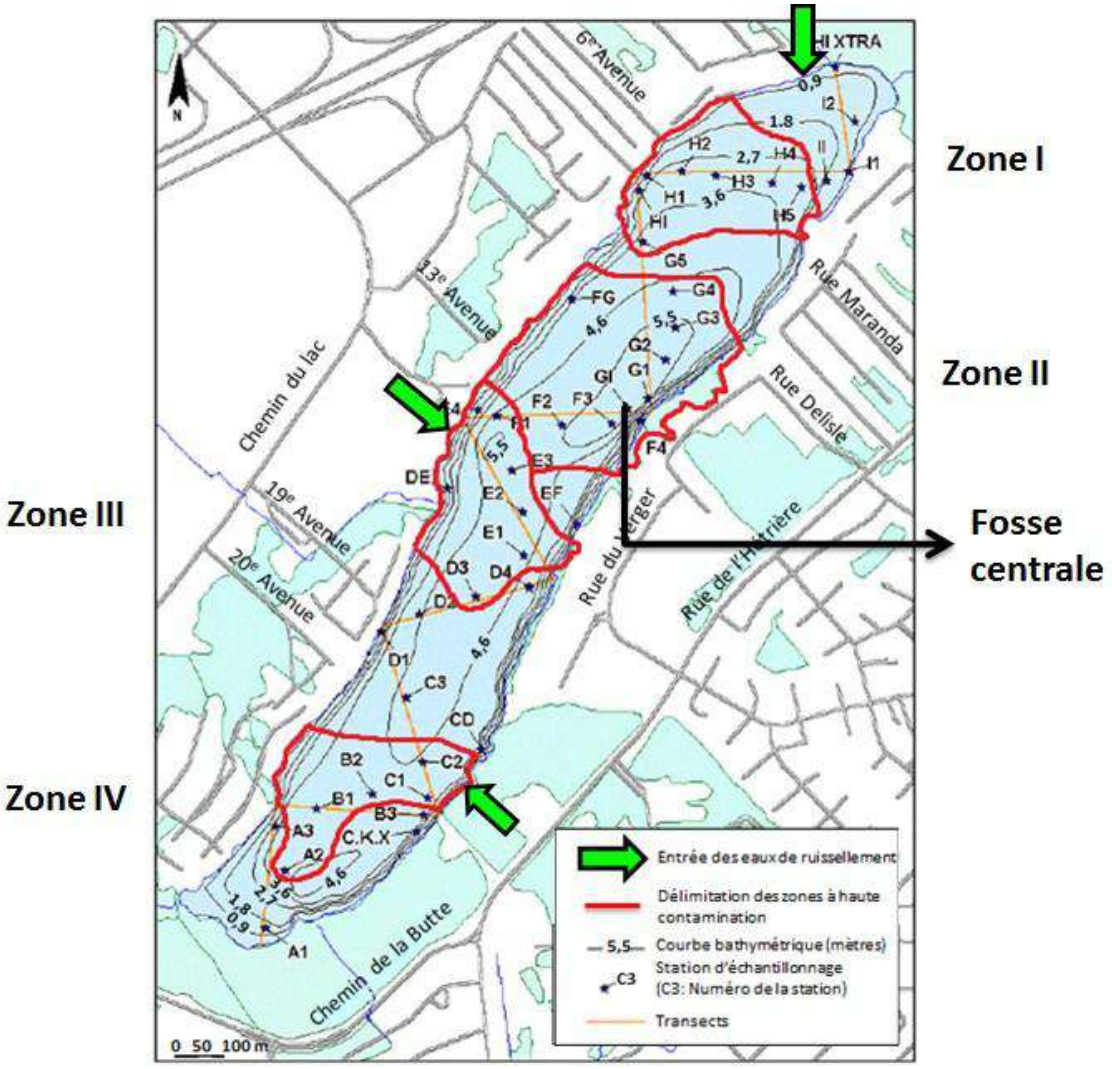


**Figure 24: Zones fortement contaminées au lac Saint-Augustin**

La superficie des zones à haute contamination est importante à connaître car c'est cet aspect qui contrôle essentiellement les coûts associés à chacun des scénarios. Pour ce faire, les zones de la figure 24 ont été représentées dans une carte GoogleEarth© et discrétisées selon plusieurs triangles. La somme des superficies de chaque triangle compris à l'intérieur d'une zone fortement contaminée représente la superficie orthogonale de cette zone. Comme le fond du lac est incliné par rapport aux superficies orthogonales discrétisées dans GoogleEarth©, il faut procéder à une majoration. Dans le cas du lac Saint-Augustin, la majoration des superficies est réalisée en considérant un facteur de sécurité conservateur de 1,3, ce qui est cohérent avec l'analyse des pentes du pourtour du lac réalisée par ProFaune. En effet, les pentes du pourtour du lac sont fortes ; la profondeur d'eau atteignant 3 mètres sur quelques dizaines de mètres (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Le tableau 14 montre les superficies orthogonales et corrigées de chacune des zones fortement contaminés de la figure 24. La somme des superficies orthogonales de chaque zone totalise 383 400 m². Les superficies corrigées doivent toutefois être utilisées pour la construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin puisqu'elles tiennent compte de la bathymétrie du lac.

**Tableau 14: Superficies des zones à haute contamination au lac Saint-Augustin**

| Zones | Superficies | Facteur de sécurité | Superficies corrigées |
|---|---|---|---|
| | m² | — | m² |
| I | 83600 | 1,3 | 108680 |
| II | 123300 | | 160290 |
| III | 94500 | | 122850 |
| IV | 82000 | | 106600 |

## 3.2 La construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés

Les scénarios à construire pour la gestion des sédiments contaminés doivent incorporer les procédés testés dans le cadre des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin sur l'une ou l'autre des zones fortement contaminées et définies dans la section précédente. Ces procédés incluent la précipitation du phosphore particulaire et des colloïdes par l'ajout d'alun, le confinement des sédiments contaminés à travers la mise en

place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable de même que le dragage des sédiments contaminés.

### 3.2.1 Le scénario A

Le scénario A comprend le dragage des zones I, III et IV suivi de la réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin. Une fois les sédiments réintroduits, la zone II est traitée à l'alun puis recouverte à l'aide d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable. Le scénario A comprend 2 sous-scénarios :

**Sous-scénario A1**

**Zones I, III & IV** : Dragage mécanique des sédiments.

**Zone II :** Réinsertion des sédiments dragués provenant des zones I, III et IV + coagulation à l'alun + recouvrement actif de pierre calcaire et de sable.

**Sous-scénario A2**

**Zones I, III & IV** : Dragage hydraulique des sédiments.

**Zone II :** Réinsertion des sédiments dragués provenant des zones I, III et IV + coagulation à l'alun + recouvrement actif de pierre calcaire et de sable.

Dans le scénario A, les sédiments provenant des zones I, III et IV sont extraits par dragage mécanique (A1) ou hydraulique (A2) et sont réinsérés directement dans la fosse centrale (zone II). Dans ce scénario, les phases liquide et solide issues du dragage ne sont pas séparées avant la réinsertion des sédiments dans la fosse centrale. En effet, la séparation des phases n'est pas requise puisqu'un procédé combinant coagulation à l'alun et mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable fait suite à l'étape de la réinsertion des sédiments. Des rideaux de turbidité sont néanmoins requis afin de limiter l'étendue du panache des particules remises en suspension suite aux opérations de dragage mécanique ou de réinsertion des sédiments.

Le choix de la fosse centrale pour la réinsertion des sédiments dragués tient au fait qu'il s'agit déjà d'une zone à haute contamination et que c'est l'endroit où l'impact négatif

associé à la diminution de la hauteur d'eau suite à la réinsertion des sédiments est minimal. En outre, le tassement des sédiments suite à l'application du matériau de recouvrement peut compenser la diminution de la hauteur d'eau jusqu'à un certain point. À propos, une valeur de tassement de 6% a été observée lors des essais en colonnes réalisés avant les essais *in-situ* en enclos du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Parant, 2007). Une compaction plus élevée a néanmoins été observée sur le site lors des essais en enclos du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Bourget, 2011). En d'autres mots pour le scénario A, les sédiments dragués sont concentrés en une seule zone contaminée à traiter par coagulation à l'alun suivi par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable. La figure 25 illustre les procédés de traitement envisagés sur chacune des zones à haute contamination du lac Saint-Augustin pour le scénario A.

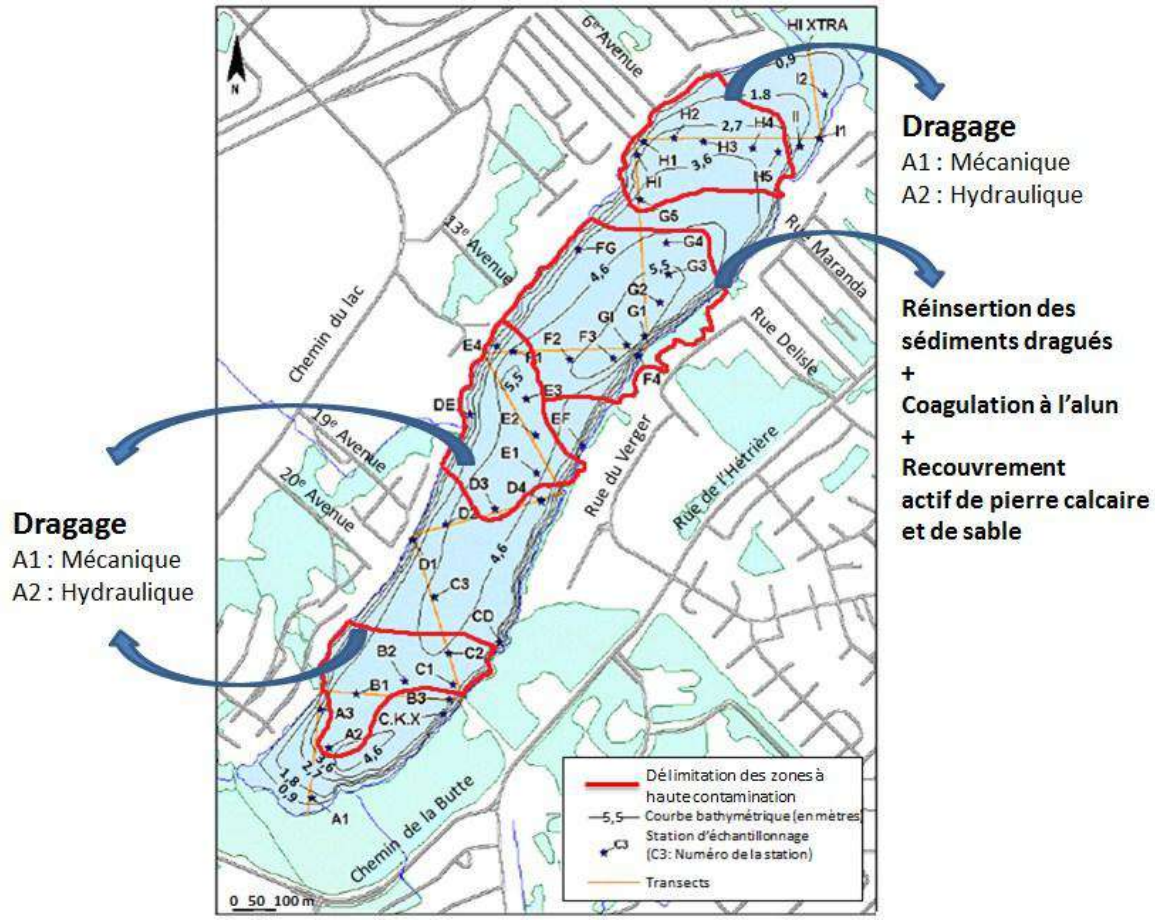


**Figure 25 : Scénario A**

Les zones fortement contaminées en métaux lourds ont été obtenues à partir de la concentration seuil produisant un effet probable (CEP). Or, tel que mentionné dans la section 3.1, des analyses de toxicité supplémentaires sont requises avant d'envisager la réinsertion de sédiments contaminés dans un milieu récepteur si les contaminants retrouvés dans les sédiments réinsérés dépassent la concentration produisant un effet observable (CEO) sans qu'il y ait dépassement de la concentration d'effets fréquents (CEF) (Environnement Canada et MDDEP, 2007). Comme la CEP est par définition supérieure à la CEO et qu'il n'y a pas dépassement de la CEF pour les contaminants retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin, de telles études seraient requises avant de procéder à la réinsertion des sédiments contaminés dans la fosse centrale pour le scénario A.

De plus, l'extraction des sédiments par dragage mécanique génère une remise en suspension importante des sédiments. Lors des essais de dragage réalisés dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin, le dragage mécanique a entraîné une augmentation de plus de 900% des particules en suspension dans la colonne d'eau (Constantin et *al.*, 2012). La réinsertion des sédiments génère aussi une importante augmentation des particules en suspension au sein de la colonne d'eau, ce qui accroît le potentiel de relargage des contaminants (Anchor Environmental CA, 2003 ; Environnement Canada, 1994). Tel qu'illustré par la figure 26, plusieurs méthodes sont disponibles pour procéder à la réinsertion des sédiments dragués dans le milieu récepteur. Dépendamment de la méthode retenue et des conditions physico-chimiques rencontrées dans la colonne d'eau, un relargage des contaminants peut survenir (USEPA and USACE, 2004 ; Environnement Canada, 1994). Enfin, la réinsertion des sédiments peut aussi s'effectuer à l'aide d'un bras télescopique qui dépose le matériau directement à l'interface eau-sédiment, ce qui limite l'augmentation des particules en suspension dans la colonne d'eau et donc le risque de relargage.

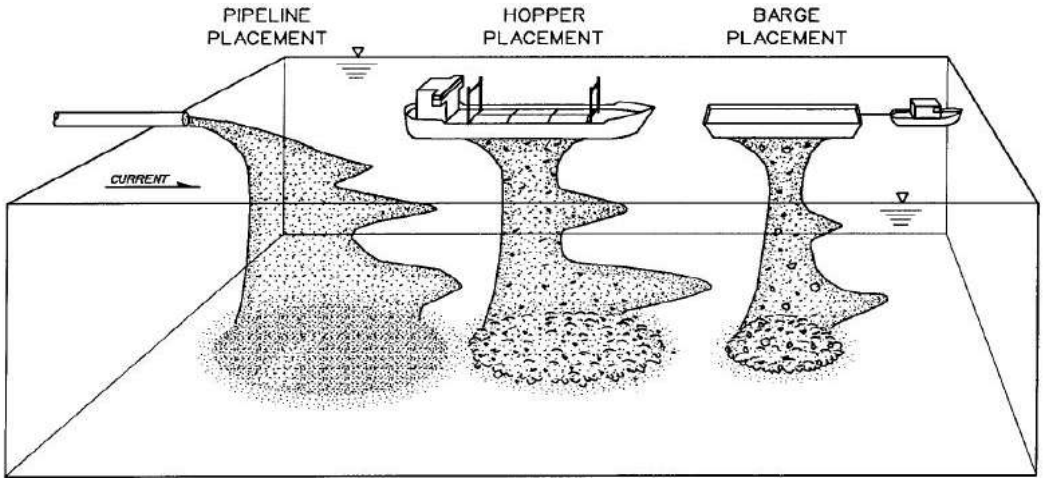


**Figure 26: Réinsertion des sédiments dragués dans le milieu récepteur (Tiré de USEPA and USACE, 2004)**

### 3.2.2 Le scénario B

Le scénario B comprend le traitement de toutes les zones à haute contamination en utilisant les procédés les plus prometteurs lorsqu'ils ont été testés à l'échelle pilote au lac Saint-Augustin. Le scénario B comprend 2 sous-scénarios :

**Sous-scénario B1**

**Zones I à IV :** Coagulation à l'alun + recouvrement actif de pierre calcaire et de sable.

**Sous-scénario B2**

**Zones I à IV :** Extraction/polymérisation des sédiments par dragage hydraulique à succion et filtration à travers un sac filtrant (valorisation *ex-situ*).

Les sous-scénarios du scénario B reposent essentiellement sur une intervention unique sur les zones à forte contamination. Ici, un sous-scénario de recouvrement actif (B1) est opposé à un sous-scénario de dragage hydraulique par succion (B2). Dans le cas du dragage hydraulique, les phases liquide et solide sont séparées par filtration à travers un sac filtrant après une étape de polymérisation des sédiments. Les sédiments extraits sont ensuite disposés ou valorisés à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant. Le recouvrement actif inclut la coagulation à l'alun du phosphore dans la colonne d'eau suivie par l'application d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable. La figure 27 illustre les procédés envisagés pour chacune des zones à haute contamination au lac Saint-Augustin pour le scénario B.

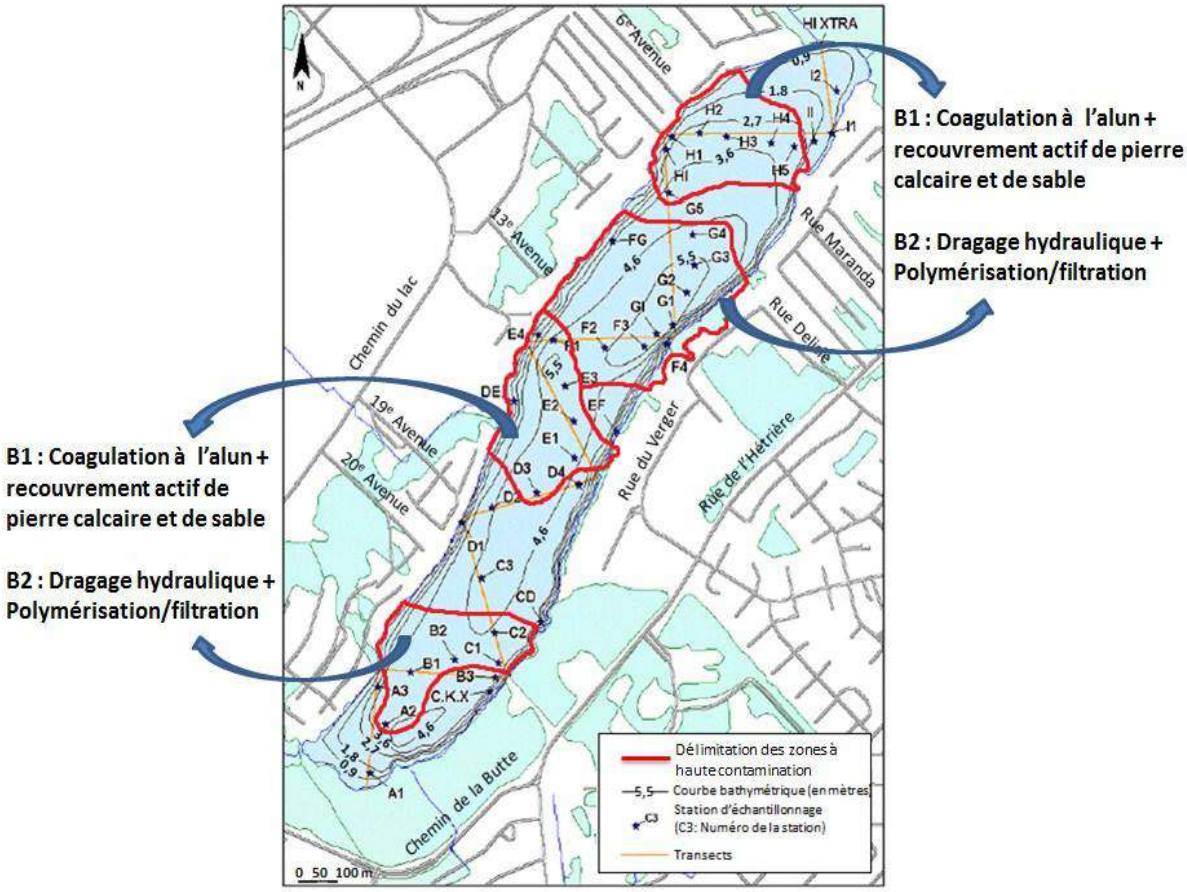


**Figure 27: Scénario B**

Le dragage mécanique des zones à forte contamination n'a pas été sélectionné puisque le niveau de perturbation d'une telle option est assurément trop grand à grande échelle et qu'un relargage du phosphore et des métaux lourds est fort probable.

### 3.2.3 Le scénario C

Le scénario C comprend le dragage des zones I, III et IV avec valorisation des sédiments dragués à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant. La zone II est traitée à l'alun puis recouverte d'une couche de pierre calcaire et de sable. Contrairement au scénario A, les sédiments ne sont pas réinsérés dans la zone II avant la mise en place du matériau de recouvrement. Le scénario C comprend 2 sous-scénarios :

**Sous-scénario C1**

**Zones I, III & IV** : Extraction/polymérisation des sédiments par dragage hydraulique à succion et filtration à travers un sac filtrant (disposition *ex-situ*).

**Zone II :** Coagulation à l'alun + recouvrement actif de pierre calcaire et de sable.

**Sous-scénario C2**

**Zones I, III & IV** : Dragage mécanique des sédiments (disposition *ex-situ*) et séparation des phases par décantation.

**Zone II :** Coagulation à l'alun + recouvrement actif de pierre calcaire et de sable.

La principale différence entre les sous-scénarios C1 et C2 réside dans le mode de dragage des zones I, III et IV. Dans les deux cas pour la fosse centrale (zone II), il y a coagulation du phosphore particulaire et des colloïdes par l'ajout d'alun et confinement des sédiments à travers la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable. Les sédiments des zones I, III et IV sont extraits par dragage hydraulique à succion (C1) ou par dragage mécanique (C2). Dans les deux cas, les sédiments dragués ne sont pas réinsérés dans la fosse centrale du lac. Ils sont plutôt disposés ou valorisés à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant. La séparation des phases se fait à l'aide de sacs filtrants ou par sédimentation selon qu'il s'agit du dragage hydraulique (C1) ou du dragage mécanique (C2). La figure 28 illustre les procédés de traitement envisagés pour chacune des zones à haute contamination au lac Saint-Augustin pour le scénario C.

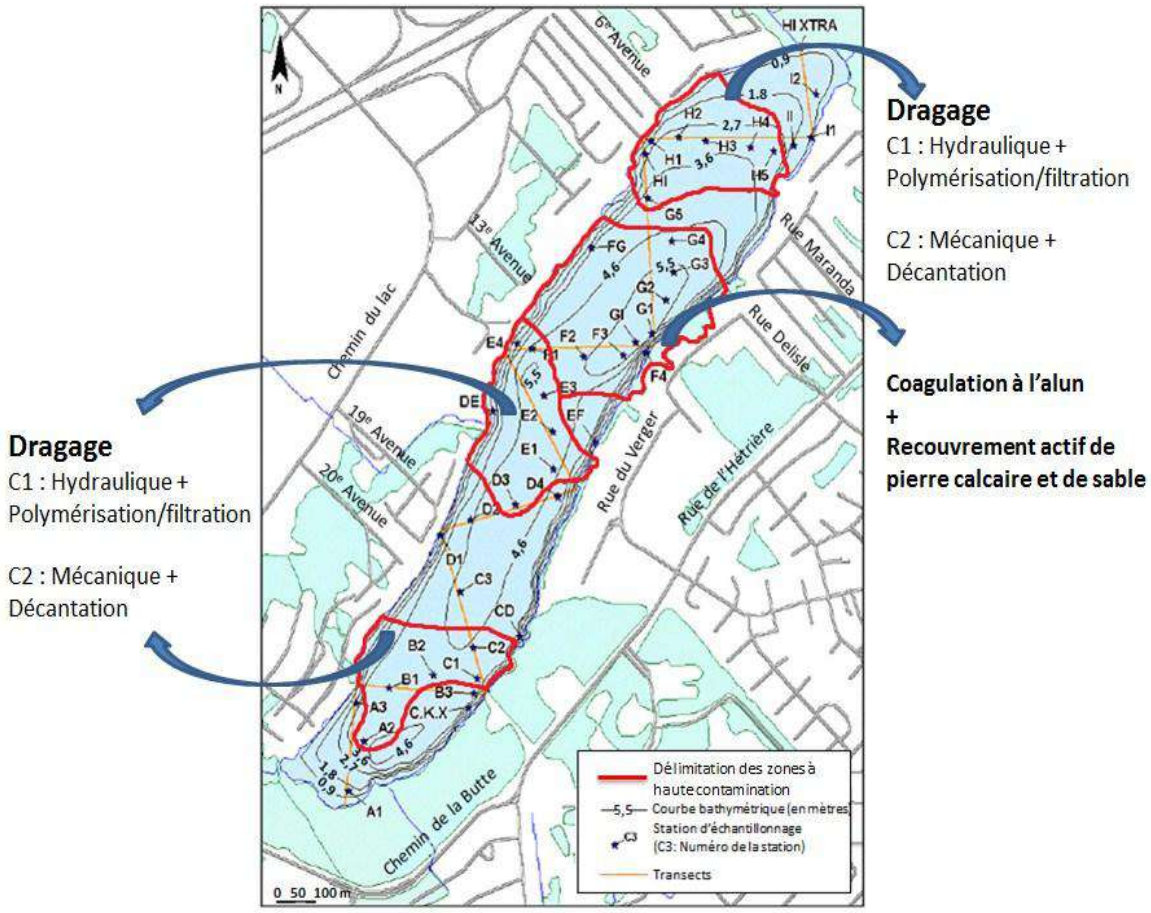


**Figure 28: Scénario C**

### 3.2.4 Le scénario D

**Scénario D :** Statu quo – ne rien faire.

Le scénario D n'est pas actuellement envisagé comme option au lac Saint-Augustin. Il a toutefois été ajouté afin de quantifier la performance de l'inaction par rapport aux autres scénarios d'action à travers l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision. Les bénéfices associés à un éventuel projet de réhabilitation au lac Saint-Augustin peuvent ainsi être mis en évidence par rapport à l'inaction.

## 3.3 Les critères et les sous-critères de la décision

Dans cette section, les critères et les sous-critères utilisés afin d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin à travers l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision sont élaborés et définis

en détails. Les critères retenus sont de nature économique, technique, sociale et environnementale. Il s'agit de critères fréquemment employés pour l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision en contexte environnemental (Sparrevik et *al.*, 2011 ; Singhe, 2010 ; Alvarez-Guerra et *al.*, 2009 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Lahdelma et *al.*, 2000 ; Marceau et *al.,* s.a.).

Pour chacun des critères énoncés ci-dessus, une liste de sous-critères est établie. Le choix de ces sous-critères est inspiré d'une revue de la littérature portant spécifiquement sur l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères et de la méthode ordinale de Holmes en contexte environnemental (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Singhe, 2010 ; Rodriguez-Mendez, 2003 ; Lahdelma et *al.*, 2000 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 1998 ; Marceau et *al.*, s.a.). Bien entendu, le choix des sous-critères doit être adapté en fonction de la nature des scénarios à confronter les uns aux autres à travers l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision. La définition des sous-critères est importante à réaliser puisqu'elle fixe les bases du barème d'évaluation à construire et préalable à l'utilisation des méthodes multicritères sélectionnées.

Enfin, un stage de 4 mois a été réalisé à l'université Laval à l'été 2010 sous la supervision de Mme Rosa Galvez, et portait sur l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères pour le choix d'un scénario de réhabilitation au lac Saint-Augustin (Singhe, 2010). Bien que le rapport de stage représente un travail très préliminaire par rapport à celui qui fait l'objet de ce mémoire, certains des sous-critères décrits dans les sous-sections qui suivent ont pris pour inspiration partielle ce document et sont naturellement beaucoup plus largement approfondis et définis ici. Dans cette section, chaque sous-critère est commenté en lien avec les procédés retenus pour la construction des scénarios. Ce rapprochement sera fort utile lors de la construction du barème d'évaluation des sous-scénarios sur chacun des sous-critères. Ce barème est présenté en détails au chapitre 4.

### 3.3.1 Le critère économique

Le critère économique se divise en quatre sous-critères : l'investissement initial du projet, les coûts d'entretien et de suivi, la disponibilité des matériaux et des équipements

spécialisés et les coûts associés à la disposition et à la valorisation des sédiments une fois extraits.

**Investissement initial du projet**

Ce sous-critère réfère uniquement à l'ensemble des coûts associés à l'implantation d'une éventuelle stratégie de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Pour les sous-scénarios construits dans la section 3.2, ces coûts incluent la location d'équipements, la main-d'œuvre, les matériaux, les produits chimiques utilisés, les structures de stockage et de séparation des phases issues du dragage, les coûts associés directement aux travaux à réaliser sur le site du lac Saint-Augustin de même que les coûts associés au transport des sédiments après dragage, le cas échéant. Les coûts associés à la mise en place de mesures d'atténuation sont également compris dans l'investissement initial du projet. La réalisation d'un projet viable et durable devrait minimiser l'investissement initial du projet sans toutefois compromettre sa qualité.

Les coûts économiques associés à l'investissement initial des différents sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin doivent d'abord être évalués pour chaque sous-scénario. Bien sûr, l'évaluation de ces coûts pour chaque sous-scénario doit inclure chacun des éléments définis ci-dessus et compris dans l'investissement initial d'un projet de gestion des sédiments contaminés. Un barème d'évaluation à l'égard de l'investissement initial requis pour l'éventuelle gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin peut alors être construit.

**Coût d'entretien et de suivi**

Les coûts d'entretien et de suivi sont des coûts qui surviennent après la réalisation d'un projet. Peu importe le contexte, il est important de vérifier la performance réelle d'une solution implantée à grande échelle et de procéder à un entretien régulier afin d'en assurer la pérennité. L'entretien et le suivi d'un projet est donc réalisé afin de préserver la viabilité et la durabilité d'une solution implantée à grande échelle. Bien que nécessaires, les coûts associés à l'entretien et au suivi doivent être minimisés.

Afin d'avoir une évaluation représentative des coûts associés à l'entretien et au suivi des différents sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin, un plan d'entretien et de suivi doit d'abord être construit et adapté en fonction des sous-scénarios proposés. Pour les sous-scénarios proposés au lac Saint-Augustin, un suivi de la qualité de l'eau est essentiel puisque c'est par celle-ci qu'est mesurée la performance des procédés implantés. Un suivi au niveau des sédiments et du matériau de recouvrement est également requis afin de valider si les sources externes et internes de contamination sont bien contrôlées. Aussi, le suivi annuel de la bathymétrie permet de vérifier l'intégrité du matériau de recouvrement dans le temps. Enfin, comme les procédés proposés dans les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés sont passablement agressifs sur le biote aquatique, un suivi à ce niveau est également requis afin de veiller à son rétablissement. Un barème d'évaluation à l'égard des coûts d'entretien et de suivi requis suite à l'implantation d'un sous-scénario de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin peut alors être construit.

**Disponibilité des matériaux et des équipements**

La disponibilité locale des matériaux et des équipements requis pour un projet a une influence significative sur les coûts totaux qui en découlent. Afin de minimiser les dépenses associées au transport des matériaux et des équipements, ceux-ci doivent être disponibles localement. En effet, la disponibilité locale des matériaux et des équipements requis entraîne la diminution des coûts en carburant et en main-d'œuvre requise pour le transport et la livraison.

Les compagnies contactées[5] pour l'évaluation des coûts économiques de chaque sous-scénario de gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin ont pu fournir des informations à ce sujet. Pour les sous-scénarios de gestion des sédiments proposés au lac Saint-Augustin, les matériaux et les équipements requis sont disponibles sur plusieurs échelles spatiales qui dépendent du procédé à implanter et du fournisseur. Suivant les compagnies contactées, les matériaux et les équipements requis sont disponibles localement dans la ville de Québec, à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la province de Québec. Dans le cas du recouvrement actif et du dragage mécanique, tous les équipements nécessaires

[5] Les compagnies contactées pour l'évaluation des coûts économiques sont présentées au chapitre 4.

peuvent provenir des environs de la ville de Québec. Quant au dragage hydraulique, les équipements sont disponibles soit dans la province de Québec ou encore au Nouveau-Brunswick, selon Jocelyn Douheret (Terratube).

**Disposition et valorisation des résidus (sédiments)**

Pour les scénarios proposés au lac Saint-Augustin, les seuls résidus susceptibles d'être générés sont associés au dragage des sédiments et comprennent les sédiments dragués de même que les eaux interstitielles. Les résidus peuvent toutefois devoir faire l'objet d'analyses supplémentaires en laboratoire dépendamment des niveaux de contamination rencontrés et de la stratégie de gestion retenue sur les phases issues du dragage après l'extraction des sédiments (MDDEP, 2011b ; Environnement Canada et MDDEP, 2007). C'est notamment le cas pour le scénario où il y a réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin qui requiert des analyses supplémentaires de toxicité. Bien entendu, les coûts dont il est question ici doivent être minimisés et la valorisation doit être préconisée à la disposition finale sans réutilisation.

Dépendamment des sous-scénarios proposés à la section 3.2, les sédiments sont réinsérés et confinés dans la fosse centrale (A1 et A2) ou encore valorisés comme matériau de recouvrement ou de remblai (B2, C1 et C2). La valorisation est possible puisqu'aucun des contaminants retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin ne dépasse le niveau B pour les sols (MDDEP, 2011b ; Ville de Québec, 2009 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005). Les coûts économiques associés à la disposition et à la valorisation des résidus doivent d'abord être évalués à partir d'une revue de la littérature. Ceux-ci sont ensuite adaptés en fonction des caractéristiques techniques des scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés pour ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Un barème d'évaluation pour les coûts de disposition et de valorisation des résidus pour les scénarios de gestion des sédiments contaminés peut alors être construit.

### 3.3.2 Le critère technique

Le critère technique se divise en cinq sous-critères : la durabilité de la solution, la performance de la solution en termes de rabattement des concentrations en phosphore

soluble, la turbidité de l'eau/potentiel de relargage des contaminants, la faisabilité et enfin la flexibilité des solutions proposées.

**Durabilité de la solution**

Les stratégies de gestion des sédiments contaminés offrent un certain niveau de performance pendant une période de temps qui varie d'une stratégie à l'autre. Bien sûr, la durabilité des solutions de contrôle *in-situ* est plus grande si les sources externes de contamination sont contrôlées, ce qui n'est pas toujours le cas. La durabilité est donc un paramètre à maximiser afin de retarder les efforts qui devront être redéployés à la fin de la vie utile d'une solution implantée. Par ailleurs, le public appréciera de ne pas avoir à subir les nuisances inhérentes à la réalisation d'un projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle à une fréquence trop élevée.

La faible profondeur du lac Saint-Augustin le rend vulnérable aux bateaux à moteur et aux hydravions qui compromettent la pérennité des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés à la section 3.2. La durabilité des sous-scénarios doit donc être donnée pour le cas où il y aurait adoption d'un règlement à cet égard.

Les méthodes de dragage offrent une durabilité supérieure à 100 ans puisque les sédiments responsables du relargage en phosphore et des symptômes d'eutrophisation qui en découlent sont retirés du milieu récepteur (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Dans le cas de la pierre calcaire, en considérant un potentiel d'absorption de 70 mg P/kg de pierre (Parant, 2007) et un relargage annuel moyen de 357,8 mg P/m² au lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005), la durabilité du procédé de recouvrement actif est plutôt de l'ordre de 30 ans si les apports externes en phosphore provenant de la zone agricole au nord du lac et pouvant s'infiltrer dans le sol en plus de ruisseler vers le lac ne sont pas contrôlés. Toutefois, un marais épurateur visant à traiter une partie de cet affluent a été construit en 2011 et pourrait permettre de rallonger la durée de vie calculée pour le matériau de recouvrement. Pour les scénarios combinant dragage et recouvrement actif des sédiments, avec ou sans la réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale, la durabilité est comprise entre 30 ans et 100 ans. L'option la moins durable est le statu quo.

**Performance de la solution – enlèvement/neutralisation des contaminants**

Le nutriment responsable des problèmes d'eutrophisation rencontrés au lac Saint-Augustin est le phosphore dont le principal apport interne provient des sédiments par relargage (Brin, 2007 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 2003). Les solutions envisagées doivent donc entraîner une diminution significative des concentrations retrouvées en phosphore soluble dans la colonne d'eau afin de ralentir, voire enrayer l'eutrophisation au lac Saint-Augustin. Une solution est donc performante si le relargage du phosphore est suffisamment contrôlé pour entraîner une diminution significative des concentrations retrouvées dans la colonne d'eau. L'objectif à long terme est de ramener les concentrations en phosphore soluble sous la limite oligo-mésotrophe, ce qui correspond à un rabattement de 85 % par rapport à la concentration actuelle avoisinant 70-80 µg/L (MDDEP, 2011a ; Ville de Québec, 2009). Le barème d'évaluation pour ce sous-critère doit donc être construit de manière à accorder un rang maximal aux sous-scénarios qui respectent l'objectif fixé de 85 %.

La performance retenue par procédé de traitement correspond au rabattement maximal des concentrations en phosphore soluble observé lors des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin réalisés respectivement en 2009 et en 2011. La performance par sous-scénario peut être calculée en faisant une moyenne pondérée des performances attendues par procédé sur les superficies corrigées des zones à haute contamination où ils sont appliqués.

La performance de la réinsertion des sédiments dans la fosse centrale n'a pas été évaluée lors des essais pilotes réalisés au lac Saint-Augustin en 2009 et 2011. La littérature indique toutefois qu'un relargage peut survenir dans la colonne d'eau, mais que les impacts négatifs sont locaux et de courte durée (Fredette and French, 2004). La performance des sous-scénarios où il y a réinsertion des sédiments (A) peut donc être revue légèrement à la baisse par rapport au cas où les sédiments sont valorisés à l'extérieur du bassin versant (C).

**Turbidité de l'eau et potentiel de relargage**

La remise en suspension des sédiments peut entraîner la désorption du phosphore et des métaux lourds, ce qui a pour effet de diminuer la qualité de l'eau en plus de perturber le

milieu récepteur (Environnement Canada, 1994). La turbidité est un paramètre indicateur du nombre de particules en suspension dans l'eau (Crittenden et *al.*, 2005) et doit être minimisée pour les stratégies de gestion envisagées au lac Saint-Augustin.

En théorie, le dragage hydraulique génère une remise en suspension importante des sédiments, mais toutefois moins importante que dans le cas du dragage mécanique (Suedel et *al.*; 2008, Birdwell and Thibodeaux, 2007 ; Mattson et *al.*, 2003 ; Anchor Environmental CA, 2003; Environnement Canada, 1994). C'est une tendance qui a également été observée au lac Saint-Augustin lors des essais pilotes en plate-forme de l'été 2011. À propos, la transparence Secchi a diminué pendant quelques jours pour le dragage hydraulique et quelques semaines pour le dragage mécanique, mais ne s'est pas accompagnée d'une augmentation de la concentration en phosphore soluble dans le cas du dragage hydraulique. Dans le cas du dragage mécanique, les particules en suspension dans l'eau ont augmenté de plus de 900%. La remise en suspension des sédiments a donc été identifiée comme étant responsable de l'augmentation des concentrations retrouvées en phosphore soluble dans la colonne d'eau pour le dragage mécanique. De plus et contrairement au dragage hydraulique, les concentrations en fer dans l'eau suite au dragage mécanique des sédiments sont montées à 0,85 mg/L, ce qui est bien au-delà du seuil de qualité fixé par le MDDEP de 0,3 mg/L (Constantin et *al.*, 2012).

Bien que la réinsertion des sédiments dans le milieu récepteur entraîne une augmentation importante de la turbidité (USEPA and USACE, 2004), cet effet est temporaire et la proportion des sédiments demeurant en suspension chute rapidement pour se stabiliser autour de 1 % à 5 % des sédiments réinsérés (Fredette and French, 2004). Il n'est toutefois pas impossible d'observer un phénomène de relargage en phosphore et en métaux lourds dans la colonne d'eau dépendamment des conditions physico-chimiques rencontrées. Dans la littérature, la remise en suspension des sédiments associée à la mise en place d'un matériau de recouvrement actif granulaire est faible et survient principalement lorsque le matériau touche le fond (Bourget et *al.*, 2011 ; Lyons et *al.*, 2006 ; Fredette and French, 2004).

**Faisabilité de la solution**

De nombreuses alternatives pour la gestion des sédiments contaminés sont disponibles dans la littérature. Dépendamment du site, des propriétés des sédiments et des caractéristiques du milieu, certaines de ces techniques s'implantent plus facilement que d'autres. L'objectif est donc d'obtenir la solution la plus faisable techniquement compte tenu des réalités du site.

Avec une teneur en eau avoisinant 90 %, les sédiments lâches et non consolidés du lac Saint-Augustin se prêtent davantage au dragage hydraulique qu'au dragage mécanique (Ville de Québec, 2009 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005). La mise en place de rideaux de turbidité doit être envisagée dans le cas du dragage mécanique afin de limiter l'impact négatif associé à la remise en suspension des sédiments. De plus, le dragage mécanique tend à être moins précis avec la profondeur, ce qui affecte l'uniformité du dragage, la performance et donc la faisabilité (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Le traitement des eaux à l'alun suivi du recouvrement des sédiments est une solution qui est également réalisable au lac Saint-Augustin. Cependant, cette méthode entraîne une diminution de la hauteur de la colonne d'eau dans un lac déjà peu profond et des difficultés additionnelles sont à prévoir puisque les pentes du fond sont prononcées (Consortium DDM – ProFaune, 2005). La réinsertion des sédiments dans la fosse centrale est une solution faisable moyennant des équipements spécialisés et certaines mesures d'atténuation (ex. : rideau de turbidité). L'impact de la qualité de l'eau au moment de la réinsertion des sédiments n'est toutefois pas quantifié spécifiquement pour le cas du lac Saint-Augustin.

**Flexibilité de la solution**

La flexibilité d'une solution de restauration représente sa capacité à se coupler à d'autres alternatives de gestion en vue d'obtenir un gain de performance à moindres coûts tout en tenant compte des initiatives existantes sur le bassin versant. Un scénario de gestion des sédiments contaminés doit naturellement être le plus flexible possible.

Au lac Saint-Augustin, les techniques de recouvrement actif et de dragage hydraulique sont plus flexibles que le dragage mécanique. En effet, un gain de performance est obtenu lorsqu'il y a coagulation préalable de l'eau à l'alun dans le cas du recouvrement actif et

lorsqu'il y a polymérisation des sédiments dans le cas du dragage hydraulique (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Constantin et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011). Dans le cas du dragage mécanique et de la réinsertion des sédiments dans la fosse centrale, le gain de performance s'obtient par la mise en place de mesures d'atténuation, ce qui en fait des scénarios moins flexibles. La flexibilité d'une solution peut donc se mesurer d'une part par son potentiel à se coupler à d'autres procédés permettant d'obtenir un gain de performance de même que par les mesures d'atténuation qui sont requises d'autre part.

### 3.3.3 Le critère social

Le critère social se divise en cinq sous-critères : les nuisances subies par les travailleurs et les riverains, l'acceptabilité sociale du projet par le public, l'accessibilité financière du projet par les contribuables, le gain social/restauration des usages du lac et l'intégration du projet à la communauté de façon structurante.

Afin de mesurer la performance de chacun des procédés utilisés pour la construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin sur les sous-critères sociaux, un sondage de consultation a été réalisé. Le questionnaire utilisé pour le sondage de consultation est non-nominatif au sens où aucune donnée recueillie est de nature personnelle ni ne permet l'identification des participants. Par ce questionnaire, le public était appelé à titre d'expert afin d'évaluer chaque procédé retenu pour la construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin sur les sous-critères sociaux listés ci-dessus. Le formulaire a été réalisé en tenant compte des recommandations à suivre pour la création d'un sondage d'opinion (Brossier et Dussaix, 1999).

Dans un premier temps, le questionnaire a été distribué à des résidents de la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures de même qu'à des non-résidents afin de connaître leurs positions par jeu de rôles face aux procédés de traitement envisagées. Le rôle demandé aux répondants était de se mettre dans la peau d'un riverain devant vivre avec les aspects positifs et négatifs liés à la réalisation de travaux incorporant les procédés retenus pour la construction des scénarios au lac Saint-Augustin. L'idée était de recueillir des renseignements provenant de personnes qui ne vivent pas en relation directe avec le lac et de voir quelle est l'opinion sociale générale face à la mise en place d'un projet de gestion

des sédiments contaminés pour un lac eutrophe. Ensuite et avec la collaboration du Conseil de Bassin du Lac Saint-Augustin (CBLSA), deux groupes ont été formés parmi les membres du conseil d'administration réunis en décembre 2011 pour répondre au questionnaire et échanger sur les procédés de traitement à travers un focus groupe. Le premier groupe est constitué de 5 riverains alors que le deuxième comprend 5 résidents du bassin versant n'ayant pas un accès direct au lac Saint-Augustin. Les réponses au questionnaire de même que le questionnaire peuvent être consultés à l'annexe E. Les résultats préliminaires tirés des réponses de ce questionnaire sont résumés pour chacun des sous-critères sociaux.

**Nuisances subies par les travailleurs et riverains**

Les nuisances potentielles à subir et associées à l'implantation d'un scénario de gestion des sédiments contaminés à grande échelle incluent les mauvaises odeurs, le bruit, le niveau de poussière, la perte temporaire des usages du lac, la durée des travaux, etc. Certains inconvénients sont malheureusement inévitables et peuvent causer des insatisfactions chez les individus exposés. Dans cette optique, il est de bonne pratique d'évaluer le niveau de nuisance appréhendé pour chaque scénario à l'étude. Bien sûr, l'option la plus souhaitable est celle qui minimise les nuisances à subir par la population. Par ailleurs, certaines nuisances peuvent être pires que d'autres à subir et peuvent varier d'un individu à l'autre, d'où l'intérêt de consulter la population à ce sujet et d'adapter le barème d'évaluation en conséquence.

Le tableau 15 présente les nuisances appréhendées pour chacun des procédés retenus pour la construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. L'importance relative de chaque nuisance y est indiquée et est tirée des résultats préliminaires obtenus suite à la diffusion du sondage de consultation de l'annexe E. D'après les résultats préliminaires du sondage, la pire nuisance à subir correspond à la présence de mauvaises odeurs. L'augmentation du niveau de poussière et du niveau sonore représentent deux nuisances importantes mais moins pires à subir que les mauvaises odeurs. L'augmentation de la circulation associée à la livraison de matériaux par camions et le risque accru d'accidents qui en découle arrivent en troisième position. Enfin, les nuisances les moins pires à subir incluent la suspension des usages du lac lors des travaux de même

que la présence possible d'infrastructures temporaires requises pour procéder à la mise en œuvre d'un scénario de gestion des sédiments contaminés à grande échelle. Les nuisances présentées au tableau 15 par procédé doivent être extrapolées aux scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés qui peuvent incorporer plusieurs procédés sur l'une ou l'autre des zones les plus contaminées du lac Saint-Augustin.

**Tableau 15: Sommaire des nuisances appréhendées selon la stratégie de gestion retenue**

| Nuisances | Importance de la nuisance | Dragage mécanique | Dragage hydraulique | Recouvrement actif | Réinsertion des sédiments | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Augmentation significative du niveau sonore**[6] | 2 | X | | | | |
| **Augmentation de la circulation par camions (livraisons de matériaux)**[7] | 3 | | | X | | |
| **Suspension des usages du lac lors des travaux** | 4 | X | | | X | X |
| **Présence d'odeurs désagréables** | 1 | X | | | X | |
| **Augmentation significative du niveau de poussière** | 2 | | | X | | |
| **Construction de structures pour les travaux** | 4 | X | X | X | | |

**Acceptabilité sociale du projet par le public**

L'acceptabilité sociale d'un projet à dimension environnementale est une composante essentielle et fondamentale de la dimension sociale (Bortone et *al.*, 2004). Un projet environnemental s'accompagne généralement de compromis que doit faire la population afin d'augmenter la durabilité et la viabilité du projet (Kiker et *al.*, 2005). Par exemple, au lac Saint-Augustin, l'adoption d'un règlement municipal visant à limiter la taille des

[6] La perturbation sonore associée au dragage hydraulique est moins importante que pour le dragage mécanique (Consortium DDM – ProFaune, 2005).
[7] L'augmentation de la circulation par camions est liée à la livraison des matériaux de recouvrement.

moteurs ou à interdire les embarcations motorisées sur le lac permettrait de rallonger la durée de vie des scénarios proposés et pourrait ne pas faire l'affaire de tous. Par ailleurs, alors que certaines personnes peuvent ne pas être à l'aise avec l'idée de réintroduire les sédiments contaminés dans la fosse centrale pour concentrer les efforts de restauration à un seul endroit, d'autres peuvent être réticents à l'idée d'ajouter des produits chimiques à l'eau ou aux sédiments afin d'accroître la performance du traitement. Bien que les risques et incertitudes associés à la réinsertion des sédiments aient été minimisés par plusieurs décennies de données, cette méthode n'est généralement pas populaire (Fredette and French, 2004).

La théorie du jugement social met en évidence trois types de latitude au sein d'une population cible : latitude d'acceptation, latitude de refus et latitude de non-engagement. La latitude d'acceptation comprend la meilleure option de même que les options jugées acceptables par la population. À l'inverse, la latitude de refus représente les options à rejeter d'emblée et la latitude de non-engagement représente les options neutres qui ne sont ni acceptables ni inacceptables aux yeux du public (Kyle et *al.*, 2003). La population doit donc être consultée pour déterminer s'il y a présence d'objections face à l'un ou l'autre des procédés retenus pour la construction des scénarios d'une part et si elles sont ponctuelles ou généralisées d'autre part.

Les résultats préliminaires obtenus à l'aide du sondage de consultation de l'annexe E ont permis d'évaluer l'acceptabilité sociale des procédés retenus pour la construction des scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Suivant les résultats du sondage, le public voit peu ou pas d'objections pour le dragage hydraulique et l'utilisation de produits chimiques afin d'augmenter les performances techniques des solutions proposées. La mise en place d'un règlement visant à limiter ou à interdire les embarcations motorisées est également généralement acceptée. Il y a quelques objections ponctuelles pour le recouvrement actif lorsque ce procédé est comparé au dragage des sédiments. La réinsertion des sédiments dans la fosse centrale semble aussi faire l'objet d'objections ponctuelles et le public est très réticent avec le dragage mécanique. Il semblerait toutefois que le recouvrement actif soit une méthode mal comprise qui nécessite davantage d'explications.

**Accessibilité financière du projet par les contribuables**

La question entourant le financement quant à la réalisation d'un projet de gestion des sédiments contaminés pour le cas du lac Saint-Augustin est épineuse. Lorsqu'il s'agit d'aller de l'avant avec un projet de cette envergure en environnement, la question qui s'impose d'emblée est : qui paye? Comme la population du bassin versant toute entière bénéficie des efforts de restauration au lac Saint-Augustin, il va de soi qu'elle soit impliquée dans son financement jusqu'à un certain point. Il est donc primordial de bien connaître le rôle qu'est prêt à jouer le public dans le financement d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle au lac Saint-Augustin. Bien entendu, ce sous-critère est respecté lorsqu'il y a respect de la capacité et de la volonté de payer des contribuables pour un niveau de performance donné. Encore une fois, la population doit être consultée afin d'évaluer l'accessibilité financière de chaque scénario proposé au lac Saint-Augustin.

En général, on observe une corrélation positive entre l'engagement populaire face à la restauration d'un milieu contaminé et le prêt-à-payer des contribuables pour l'implantation d'un procédé de traitement (Kyle et *al.*, 2003). Les résultats préliminaires du sondage de consultation présentés à l'annexe E révèlent quelques ouvertures intéressantes quant à l'accessibilité financière des scénarios de gestion proposés pour les sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Suivant les résultats du sondage, il semble y avoir existence d'un prêt-à-payer pour la mise en place d'une solution de gestion des sédiments contaminés ainsi qu'un prêt-à-payer plus cher pour une solution qui offre un gain de performance. De plus, la solution retenue doit atteindre le plus haut rendement possible et, si possible, dépasser les normes en vigueur au Québec. Il y a également une certaine ouverture à rendre certaines activités payantes au lac Saint-Augustin pour financer les efforts de restauration. En d'autres mots, pour deux scénarios de coûts semblables, une accessibilité financière plus élevée doit être octroyée à celui qui maximise la performance technique attendue. Aussi, une option qui coûte plus cher est accessible financièrement si et seulement si elle offre un niveau de performance technique plus élevé que ses rivales. Les coûts considérés pour ce sous-critère incluent les coûts définis dans le critère économique : les coûts de mise en place, les mesures d'atténuation, les coûts de valorisation des sédiments et les coûts

d'entretien et de suivi. Le statu quo est une option trop dispendieuse à long terme pour le niveau de performance offert.

**Gain social et restauration des usages du lac**

D'un point de vue social, la motivation principale derrière la mise en place d'un scénario de gestion des sédiments contaminés à grande échelle est la récupération des usages du lac après l'intervention. Certaines personnes accordent une importance plus ou moins grande dépendamment de l'usage restauré et il faut consulter la population afin de connaître les importances respectives qu'elle accorde à chaque type d'usage.

Au lac Saint-Augustin, le phosphore présent dans l'eau peut entraîner des floraisons de cyanobactéries dont certaines espèces produisent des toxines dangereuses et toxiques pour la faune et l'être humain (Bouchard-Valentine, 2004). Le niveau de rabattement en phosphore dans la colonne d'eau après l'implantation de la solution a donc un impact significatif sur la restauration des usages du lac et sur le gain social qui s'y rattache. La remise en suspension des sédiments doit également être contrôlée afin d'éviter la désorption des contaminants qui détériore la qualité de l'eau. Les personnes sondées pour l'appréciation de ce sous-critère soulignent l'importance de minimiser les impacts environnementaux et le désir de pouvoir un jour se baigner et/ou pêcher à nouveau dans le lac. Ces deux activités nécessitent toutefois un rabattement plus important du phosphore soluble dans l'eau et une remise en suspension des sédiments plus faible que les activités de contact indirect avec l'eau telles que le canot ou le kayak.

Le gain social au lac Saint-Augustin peut donc s'évaluer par le gain en termes d'usages restaurés suite à l'intervention. Vu leurs performances en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble dans l'eau, on peut penser que le dragage hydraulique et le recouvrement actif permettront la baignade et l'ensemencement du lac en poissons pour la pêche à court terme. Le dragage mécanique offre une faible performance et favorise la remise en suspension. En conséquence, les scénarios de dragage mécanique pourraient ne pas permettre le retour de la baignade et/ou de la pêche à moyen terme. La réinsertion des sédiments n'étant pas documentée pour le cas du lac Saint-Augustin, le retour de la baignade demeure une issue possible. Enfin, aucun gain social n'est associé au statu quo.

**Intégration du projet à la communauté de façon structurante**

La réalisation d'un projet de gestion de sédiments contaminés est généralement l'aboutissement de plusieurs efforts antérieurs. D'abord, les sources de contamination externes doivent être localisées, caractérisées, contrôlées à la source et un plan d'action doit être élaboré. Ces initiatives ont été réalisées dans le plan directeur du lac Saint-Augustin dont le sommaire est présenté à l'annexe A. En parallèle s'effectue la caractérisation des sédiments et de la colonne d'eau afin d'identifier les sources internes de polluants et les conditions favorisant leur relargage. Des solutions peuvent ensuite être élaborées et testées à l'échelle pilote avant l'implantation à grande échelle. À chaque pas, le public est sollicité d'une façon ou d'une autre : contrôle à la source de la contamination anthropogénique, prise de mesures, participation à des réunions d'informations pour le tenir au courant des initiatives réalisées, des principaux résultats, des objectifs poursuivis, etc.

Les scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin doivent tenir compte des réalisations passées et s'inscrire dans le processus global de restauration d'une façon structurée. La consultation de la population est une bonne façon de vérifier sa perception face à l'intégration structurée des différentes options de gestion des sédiments contaminés aux initiatives et stratégies de participation locales déjà en place sur le bassin versant. Suivant les résultats préliminaires obtenus suite à la diffusion du sondage de consultation de l'annexe E, tous les procédés retenus pour la construction des scénarios sont clairs à l'exception de la méthode de recouvrement actif qui nécessiterait davantage d'explications. Alors que la réinsertion des sédiments peut sembler un scénario nouveau pour certains, le statu quo ne s'inscrit définitivement pas dans la suite logique des efforts antérieurs réalisés à ce jour au lac Saint-Augustin.

### 3.3.4 Le critère environnemental

Le critère environnemental se divise en quatre sous-critères : la récupération des matériaux et/ou des sédiments, la gestion éco-responsable des contaminants, la qualité de l'eau et de l'air de même que la récupération de l'écosystème après l'implantation de la solution.

Pour l'appréciation de certains sous-critères environnementaux, des expériences en laboratoire visant à caractériser les phases liquide et solide issues du dragage doivent être réalisées. Le protocole utilisé dans le cadre de ce projet de maîtrise pour la caractérisation des phases issues du dragage de même que les résultats préliminaires obtenus lors des expérimentations en laboratoire sont détaillés à l'annexe F. Essentiellement, les sédiments extraits par dragage mécanique et hydraulique dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin ont été caractérisés en phosphore total et selon les quatre métaux lourds prioritaires identifiés précédemment et amenés au lac par le ruissellement urbain (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012) : le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc. Des tests de lixiviation des contaminants inorganiques ont également été conduits afin d'évaluer la mobilité de ces contaminants dans les sédiments du lac Saint-Augustin. Dans le cas des sédiments issus du dragage hydraulique, les phases ont été séparées par polymérisation et filtration des boues pompées et ont été caractérisées en phosphore et en métaux lourds. Pour le dragage mécanique, la séparation des phases se fait par décantation simple et le surnageant a été caractérisé par Boris Constantin (Constantin et *al.*, 2012).

**Récupération des matériaux et/ou des sédiments**

De façon générale, les matériaux à utiliser pour la réalisation d'un projet peuvent être récupérés à la suite de projets antérieurs ou provenir d'un fournisseur qui exploite la ressource naturelle, la transforme et vend la matière ainsi transformée. De la même manière, les résidus peuvent être valorisés dans une autre phase du projet à l'intérieur duquel ils sont générés, dans un autre projet ou tout simplement disposés au respect des normes et règlementations en vigueur. Dans le cas d'un projet de gestion de sédiments contaminés, la récupération de matériaux et/ou la valorisation des sédiments doit être encouragée et favorisée. Le barème d'évaluation pour ce sous-critère est donc directement lié à la construction des scénarios et aux niveaux de contamination retrouvés dans les phases issues du dragage et qui influencent la stratégie de gestion à adopter.

Pour le cas du lac Saint-Augustin, le sable et la pierre calcaire sont les deux matériaux choisis pour le recouvrement des sédiments. Ils sont disponibles localement et pourraient provenir directement de fournisseurs tels que Construction & Pavage Portneuf inc. et Carrière Union ltée. À l'opposé, les résidus générés au lac Saint-Augustin suite aux

activités de dragage sont essentiellement des sédiments contaminés. À la lumière des résultats préliminaires obtenus en laboratoire pour la caractérisation des phases issues du dragage et en complément avec les données de caractérisation disponibles pour le cas du lac Saint-Augustin, les sédiments dragués pourraient être récupérés comme matériau de recouvrement dans un site d'enfouissement sanitaire ou comme matériau de remblayage. Cela est rendu possible puisque que le niveau de contamination en métaux lourds ne dépasse pas le niveau B pour les sols contaminés (MDDEP, 2011b; Consortium DDM – ProFaune, 2005).

Les sédiments dragués pourraient également être réintroduits dans la fosse centrale moyennant une étude de toxicité supplémentaire puisque les concentrations retrouvées en métaux lourds dépassent la concentration d'effets occasionnels (CEO) sans dépasser la concentration d'effets fréquents (CEF) (Environnement Canada et MDDEP, 2007). Ces seuils ont été définis et discutés en détails dans la section 3.1.

**Gestion éco-responsable des contaminants**

L'implantation d'un scénario de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin aura des répercussions sur les trois dimensions du développement durable : l'économie, l'environnement et la société. Autant que possible, la gestion éco-responsable des contaminants doit se faire en respectant chacun de ces trois principes.

La réinsertion des sédiments dans la fosse centrale est économique, mais détériore grandement la qualité de l'eau en plus de générer des nuisances importantes pour les riverains. D'ailleurs, cette option de gestion pour les sédiments dragués n'a généralement pas la faveur populaire (Fredette and French, 2004). De fait, les résultats préliminaires du sondage de consultation de l'annexe E indiquent que la réinsertion des sédiments semble faire l'objet de certaines objections ponctuelles. De la même manière, le dragage des sédiments rencontre certains des principes du développement durable. En effet, le dragage mécanique entraine un relargage du phosphore et du fer contenus dans les sédiments et détériore la qualité de l'eau (Constantin et *al.*, 2012). De plus et suivant les résultats préliminaires obtenus par la diffusion du sondage de consultation de l'annexe E, ce mode de dragage n'est pas populaire au lac Saint-Augustin mais peut représenter une solution

économique par rapport aux autres. Le dragage hydraulique est socialement accepté mais peut être affublé de coûts plus importants. Alors que le statu quo ne respecte aucun des principes du développement durable, la mise en place d'un recouvrement actif respecte les trois dimensions. En effet, il s'agit d'une solution abordable générant peu de nuisances et aucun résidu à gérer.

Le barème d'évaluation pour ce sous-critère peut donc se faire selon qu'il y a respect de tous les principes, de certains des principes ou aucun des principes du développement durable. De plus, le barème d'évaluation pour ce sous-critère est directement lié aux procédés choisis pour la construction des sous-scénarios.

**Qualité de l'eau et de l'air**

Le transport des matériaux et des équipements de même que l'opération des machineries nécessaires à l'implantation des scénarios proposés au lac Saint-Augustin génèrent des émissions de poussière et de $CO_2$ qui affectent la qualité de l'air. Dans un contexte de changements climatiques, les émissions de gaz à effet de serre (GES) doivent être minimisées. Le transport par camion doit donc être minimisé et les matériaux doivent être disponibles localement. De plus, les solutions envisagées affectent aussi la qualité de l'eau, ce qui se traduit par un impact sur l'environnement et le milieu récepteur. Rappelons que la qualité de l'eau est fortement corrélée avec la remise en suspension des sédiments de même que les conditions physico-chimiques retrouvées dans l'eau (Sigg et *al.*, 2006 ; Sondergaard et *al.*, 2003 ; Penn et *al.*, 2000 ; Environnement Canada, 1994). L'impact des scénarios de gestion des sédiments contaminés sur la qualité de l'eau doit être le plus faible possible. La caractérisation des phases issues du dragage est ici essentielle afin de déterminer la qualité de la phase liquide à retourner au lac après le dragage des sédiments contaminés.

La réinsertion des sédiments dans la fosse centrale de même que le dragage mécanique affectent bien plus la qualité de l'eau que le dragage hydraulique. Le procédé qui affecte le moins la qualité de l'eau est le recouvrement actif des zones à haute contamination. De plus, les résultats présentés à l'annexe F (section F.4) pour la caractérisation des phases issues du dragage indiquent que les eaux interstitielles après séparation des phases liquide et solide sont de qualité suffisante pour être retournées directement au lac sans traitement

additionnel. Le nombre de voyages par camions nécessaire pour l'approvisionnement en matériaux de recouvrement ou pour la disposition/valorisation des sédiments après extraction est fonction de la superficie sur laquelle s'applique chaque procédé. La durée totale des travaux influence aussi ce sous-critère au sens où la machinerie lourde utilisée libère des GES qui influencent la qualité de l'air. Ces paramètres doivent être qualitativement estimés pour chacun des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin pour l'appréciation de ce sous-critère environnemental. Le statu quo n'entraîne pas une augmentation de la qualité de l'eau (déjà mauvaise au lac Saint-Augustin), ni une diminution de la qualité de l'air.

**Récupération de l'écosystème après implantation de la solution**

La mise en œuvre d'un scénario de gestion des sédiments contaminés au sein d'un lac eutrophe génère une perturbation de l'écosystème plus ou moins grande selon le procédé implanté. L'importance de cette perturbation doit être minimisée et, sachant qu'elle ne peut pas être complètement évitée, l'écosystème doit pouvoir récupérer facilement et rapidement après l'implantation de la solution retenue. Le barème d'évaluation pour ce sous-critère est donc directement lié aux procédés choisis pour la construction des scénarios.

Pour ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin, les efforts de gestion des sédiments contaminés sont concentrés uniquement sur les zones à haute contamination et non à l'ensemble du lac, ce qui aide à la récupération globale de l'écosystème. La récupération du milieu après la mise en place d'un matériau de recouvrement est plus facile et plus rapide que dans le cas du dragage des sédiments. De plus, la mise en place d'un matériau de recouvrement suite à l'ajout d'alun isole les composés toxiques d'aluminium ayant précipité au fond, ce qui protège les daphnies et autres gastéropodes qui se nourrissent directement sur les sédiments (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012). Par ailleurs, bien que les perturbations associées aux activités de dragage soient importantes, l'écosystème semble récupérer plus facilement dans le cas du dragage hydraulique que dans le cas du dragage mécanique (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Enfin, le retour du benthos après la réinsertion des sédiments dans le milieu récepteur se fait généralement rapidement (Fredette and French, 2004 ; Environnement Canada, 1994). En d'autres mots, plus les nuisances et perturbations écosystémiques sont élevées, plus un écosystème « sain » prend

du temps à s'établir. Le statu quo ne favorise aucunement le déplacement de l'écosystème actuellement présent au lac Saint-Augustin vers un écosystème plus sain et caractéristique des lacs en bonne santé.

## 3.4 L'arbre hiérarchique et l'analyse de sensibilité

### 3.4.1 L'arbre hiérarchique

Une fois les scénarios/sous-scénarios construits et les critères/sous-critères définis, tout est en place pour la construction de l'arbre hiérarchique qui structure les différentes composantes de la décision selon différents niveaux. Suivant cette hiérarchie, le niveau 1 représente l'objectif poursuivi : l'identification du ou des meilleur(s) scénario(s) de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Les niveaux 2 et 3 reprennent respectivement les critères et les sous-critères définis à la section 3.3. Enfin, le niveau 4 présente les différents scénarios à confronter les uns aux autres par l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision. En référence à la section 3.2, les scénarios A, B et C ont chacun deux variantes, pour un total de 7 sous-scénarios à évaluer en incluant le statu quo. Les deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées pour ce faire incluent la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes. La figure 29 montre l'arbre hiérarchique ainsi construit et préalable à l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision et à l'identification du ou des meilleur(s) scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin.

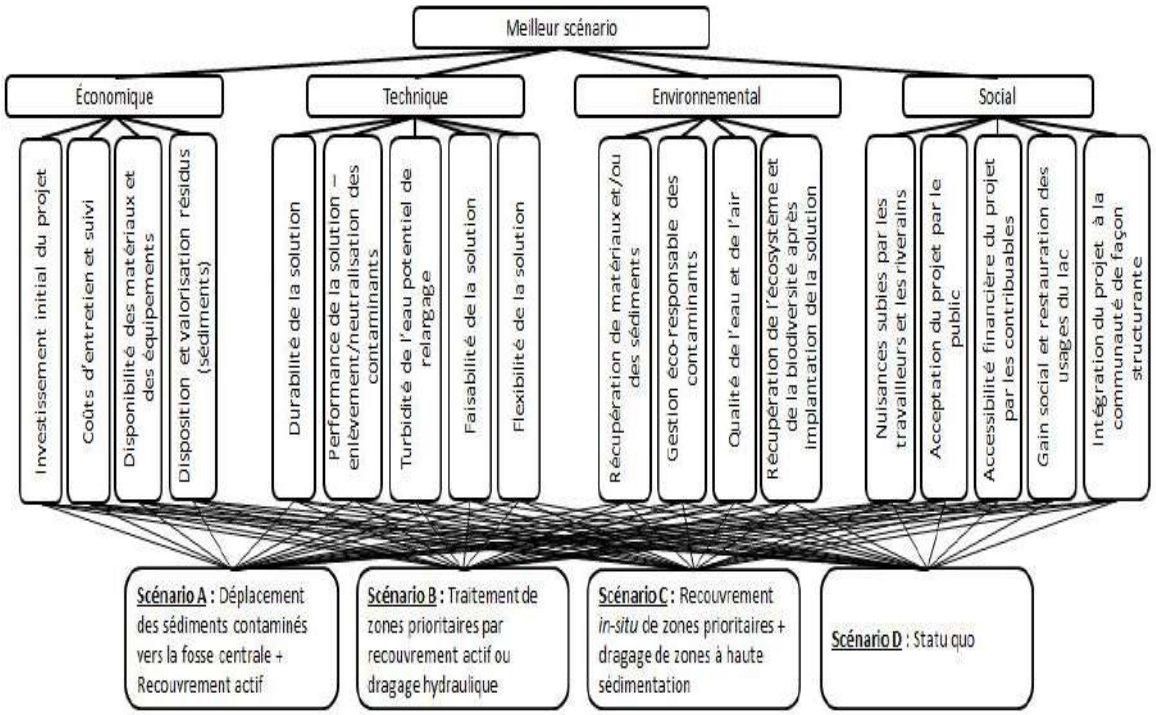


**Figure 29: Arbre hiérarchique pour le choix du meilleur scénario au lac Saint-Augustin**

### 3.4.2 L'analyse de sensibilité

La réalisation d'une analyse de sensibilité sur les importances relatives attribuées aux critères définis dans un processus décisionnel est essentielle et permet ici d'obtenir une première appréciation de la robustesse de chacun des scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Les projets environnementaux font intervenir une multitude d'acteurs issus de différents milieux et sujets à avoir des intérêts divergents (André et *al.*, 2010 ; Kiker et *al.*, 2005 ; Lahdelma et *al.*, 2000 ; Heathcote, 1998). En changeant les importances relatives des différents critères d'une situation à l'autre, l'analyse de sensibilité permet de représenter un à un le point de vue des différents acteurs impliqués dans la décision. À l'ultime, un scénario qui ressort comme étant le plus performant peu importe les importances attribuées aux critères représente une solution robuste qui risque fort de rejoindre la majorité des acteurs impliqués (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011).

Comme l'analyse de sensibilité aspire à représenter tour à tour le point de vue des différents acteurs impliqués dans un projet, ceux-ci doivent d'abord être identifiés. Pour le cas du lac

Saint-Augustin, les acteurs impliqués incluent les riverains, les habitants de la ville de Québec et de la ville de Saint-Augustin-de-Desmaures, le Conseil de Bassin du Lac Saint-Augustin (CBLSA), les élus de la ville de Québec et de la ville de Saint-Augustin-de-Desmaures, divers corps ministériels du gouvernement du Québec, l'entrepreneur qui réalisera les travaux, les groupes environnementaux, etc. Le décideur doit également être identifié et sa contribution au processus décisionnel doit être encouragée au maximum. Malheureusement, comme la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin en est encore au stade des études de faisabilité, le décideur n'est pas encore connu. Néanmoins, chacun des acteurs énumérés ci-dessus devrait idéalement être sondé de manière à dégager une tendance quant aux importances relatives à attribuer aux critères et aux sous-critères de la décision à travers différentes situations à réaliser au sein d'une analyse de sensibilité. Comme les acteurs impliqués au lac Saint-Augustin sont nombreux, ceux-ci ont été regroupés afin de simplifier l'analyse.

Afin d'évaluer la robustesse des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin, une analyse de sensibilité est réalisée sur les importances relatives allouées aux critères de la décision. De plus, l'analyse de sensibilité est réalisée en considérant seulement la méthode hiérarchique multicritères puisque les poids des critères sont par définition invariables et tous égaux selon la méthode ordinale de Holmes. Ainsi, seuls les critères économique, technique, social et environnemental sont considérés à travers différentes situations faisant varier les importances relatives de ces critères entre eux. Le tableau 16 présente quatre situations à réaliser au sein d'une analyse de sensibilité sur les critères utilisés pour l'identification du ou des meilleur(s) scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Ces situations représentent des préférences propres à différents groupes d'acteurs pouvant être impliqués dans un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

**Tableau 16: Synthèse des situations à représenter dans l'analyse de sensibilité**

| Situations | Poids relatifs des critères | Nom donné à la situation |
|---|---|---|
| **I** | [Ecn.] = [Tec] = [Env.] = [Soc.] | L'égalité des poids des critères |
| **II** | {[Ecn.] = [Tec.]} > {[Env.] = [Soc.]} | L'approche traditionnelle |
| **III** | {[Ecn.] = [Tec.]} < {[Env.] = [Soc.]} | L'approche progressiste-écologique |
| **IV** | [Env.] < [Ecn.] < {[Tec.] = [Soc.]} | Le gain de capital politique |

Dans la Loi sur le Développement Durable de la province de Québec, le développement durable « s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement » (Assemblée Nationale, 2006). Il semble donc logique de commencer l'analyse de sensibilité en créant une situation qui attribue une importance égale à tous les critères (situation I). Une approche plus traditionnelle pouvant représenter le point de vue d'un entrepreneur, de certains ministères et des personnes susceptibles d'accorder une importance plus grande aux critères technique et économique est la situation II du tableau 16. À l'inverse, la situation III est une approche plus progressiste et écologique, et représente davantage le point de vue du public ou des groupes environnementaux susceptibles d'accorder une importance plus grande aux critères environnemental et social. La quatrième situation peut représenter la position d'un politicien qui désire gagner du capital politique à travers la mise en œuvre d'un projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. En effet, un projet facilement réalisable qui offre de bonnes performances techniques tout en étant socialement performant est susceptible d'être bien perçu de la part du public qui est l'ultime décideur lors d'élections (Heathcote, 1998).

Les importances relatives établies au niveau des sous-critères de la décision ne font pas l'objet d'une analyse de sensibilité pour proposer une solution de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Le tableau 17 montre les importances relatives choisies pour chacun des sous-critères de la décision au sein de leur critère d'attache et sont fixées à la fois pour la méthode hiérarchique multicritères et pour la méthode ordinale de Holmes. Les importances relatives choisies pour chaque sous-critère ont d'abord été inspiré du rapport de stage de Singhe en 2010, puis discutées et modifiées en fonction de la littérature portant sur l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision en contexte environnemental (Galvez-Cloutier et Guesdon, 2011 ; Singhe, 2010 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Rodríguez-Méndez, 2003 ; Galvez-Cloutier et *al.*, 1998). Dans le rapport de stage de Singhe, les sous-critères et leurs importances relatives au sein de leur critère d'attache ont été déterminés suite à la consultation publique de personnes issues de plusieurs domaines spécialisés. Toutefois, ce ne sont pas tous les sous-critères du rapport de stage qui ont été conservés ici. Néanmoins, comme une consultation publique avait déjà eu

lieu, la littérature environnementale a été jugée suffisante pour attribuer les importances relatives aux autres sous-critères de la décision.

**Tableau 17 : Importances relatives des sous-critères de la décision**

| Critères | Sous-critères | Importances relatives |
|---|---|---|
| **Économique** | Investissement initial du projet | 1 |
| | Coût d'entretien et de suivi | 3 |
| | Disponibilité des matériaux et des équipements | 4 |
| | Disposition/valorisation des résidus | 2 |
| **Technique** | Durabilité de la solution | 1 |
| | Performance de la solution | 1 |
| | Turbidité de l'eau/potentiel de relargage | 2 |
| | Faisabilité de la solution | 3 |
| | Flexibilité de la solution | 4 |
| **Social** | Nuisances subies par les travailleurs et riverains | 3 |
| | Acceptabilité sociale du projet | 1 |
| | Accessibilité financière du projet | 2 |
| | Gain social/restauration des usages du lac | 1 |
| | Intégration du projet à la communauté de façon structurante | 4 |
| **Environnemental** | Récupération des matériaux et/ou des sédiments | 3 |
| | Gestion éco-responsable des contaminants | 2 |
| | Qualité de l'eau et de l'air | 2 |
| | Récupération de l'écosystème après implantation de la solution | 1 |

# Chapitre 4 Résultats

Les scénarios/sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin doivent maintenant être évalués sur chacun des sous-critères au respect d'un barème d'évaluation à construire en fonction des données disponibles dans la littérature et sur le lac Saint-Augustin. Cependant, ces données doivent d'abord être adaptées aux scénarios/sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin afin de construire un barème d'évaluation juste et conséquent. Les scénarios/sous-scénarios peuvent ensuite être évalués à l'égard de ce barème pour chacun des sous-critères. Les méthodes multicritères d'aide à la décision peuvent alors être programmés dans Excel et utilisés afin d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s)/sous-scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

Dans un premier temps, les caractéristiques techniques de chaque sous-scénario de gestion des sédiments contaminés proposés dans le cadre de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin sont décrites en détails. À partir des caractéristiques techniques détaillées pour chaque sous-scénario, les coûts économiques qui en découlent sont ensuite évalués. Ces coûts incluent l'investissement initial à réaliser pour chaque sous-scénario, les coûts de disposition/valorisation des sédiments dragués de même que les coûts d'entretien et de suivi. Suivant ces informations et en combinaison avec les résultats préliminaires obtenus suite à la caractérisation en laboratoire des phases issues du dragage des sédiments, un barème d'évaluation pour chacun des sous-critères économiques, techniques et environnementaux est construit. Le barème d'évaluation des sous-critères sociaux est construit à partir des résultats préliminaires obtenus suite à la distribution du sondage de consultation de l'annexe E. Chaque sous-scénario est ensuite évalué à l'égard de ce barème et les méthodes multicritères d'aide à la décision sont enfin utilisées afin d'identifier les sous-scénarios qui offrent le meilleur compromis sur l'ensemble des critères et des sous-critères à la fois. Les résultats obtenus à travers l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes sont enfin présentés et comparés entre eux.

## 4.1 La description des caractéristiques techniques des scénarios

La description des modalités techniques de chacun des sous-scénarios proposés ici est une étape indispensable et préalable à la construction du barème d'évaluation des sous-critères techniques, économiques et environnementaux. À ce sujet, de nombreuses données existent dans la littérature environnementale et plus particulièrement la littérature portant spécifiquement sur le lac Saint-Augustin. Ces données doivent d'abord être répertoriées puis adaptées si nécessaire en fonction de chaque sous-scénario afin de procéder à la description technique détaillée de chacun. Le tableau 18 montre un inventaire des références consultées et utilisées afin de décrire les caractéristiques techniques propres à chacun des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin.

**Tableau 18 : Références utilisées pour la description des caractéristiques techniques des scénarios/sous-scénarios**

| Auteurs | Année | Titre |
|---|---|---|
| **Constantin B. et *al.*** | **2012** | Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin - Volet 2 : Inactivation du phosphore par dragage et séparation de phases solide-liquide (version préliminaire) |
| **Galvez-Cloutier R. et *al.*** | **2012** | *An Evaluation of Several In-Lake Restoration Techniques to Improve the Water Quality Problem (Eutrophication) of Saint-Augustin Lake, Quebec, Canada* |
| **Bourget A. et *al.*** | **2011** | Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin - Volet 1 : Projet pilote d'évaluation des procédés de traitement par coagulation et recouvrement actif en enclos sur plateforme flottante |
| **Bourget A.** | **2011** | Mémoire : Coagulation à l'alun et recouvrement actif de calcaire pour contrer l'eutrophisation du lac Saint-Augustin (Québec) : Essais in situ en enclos |
| **Bourget A. et *al.*** | **2010** | Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet II – E2 : Résultats des essais de diffusion du phosphore |
| **Ville de Québec** | **2009** | Étude de faisabilité technique et économique pour l'extraction, le traitement et la disposition des sédiments du lac Saint-Augustin |
| **Consortium DDM - ProFaune** | **2005** | Développement d'un outil de gestion in-situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin (Dossier #33666) |
| **Agence de l'eau Artois-Picardie** | **2004** | Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués |

### 4.1.1 Les caractéristiques techniques

Les performances techniques de la coagulation-floculation du phosphore par l'alun, du recouvrement actif des sédiments à l'aide de pierre calcaire et de sable de même que la combinaison de ces deux méthodes ont déjà été mesurées dans le cadre du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Bourget et *al.*, 2011 ; Bourget, 2011). La description détaillée des caractéristiques techniques des sous-scénarios qui incluent ces procédés de gestion des sédiments contaminés sur l'une ou l'autre des zones prioritaires à traiter se fait donc sans problèmes.

En ce qui a trait au dragage mécanique et au dragage hydraulique des sédiments contaminés, quelques analyses supplémentaires sont requises en laboratoire, notamment pour la caractérisation des phases issues du dragage en phosphore et en métaux lourds. Le protocole suivi, les expériences réalisées, les équipements utilisés de même que les résultats préliminaires issus de ces expériences en laboratoire sont d'ailleurs présentés en détails à l'annexe F. De plus, la mesure des performances techniques de ces deux modes de dragage en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau a été réalisée dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Constantin et *al.*, 2012). Les résultats obtenus au terme du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin sont utilisés en combinaison avec la littérature disponible sur les outils de dragage (Ville de Québec, 2009 ; Consortium DDM – ProFaune, 2005 ; Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004) et les résultats préliminaires obtenus en laboratoire pour décrire les caractéristiques techniques des scénarios/sous-scénarios de dragage.

Les étapes à parcourir pour le choix du dragage comme stratégie de gestion des sédiments contaminés sont résumées à la figure 30 (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Avant l'extraction des sédiments, il faut connaitre les différentes options disponibles pour la disposition et/ou la valorisation, le transport et le traitement des matériaux dragués (Pantazidou et *al.*, 2009 ; Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Le choix d'une alternative de valorisation des sédiments se fait par la prise en compte de la nature du sédiment, de son niveau de contamination et du type de contamination, à savoir organique ou inorganique. Certaines filiales de gestions sont alors préconisées par rapport à d'autres,

d'où l'importance de procéder à la caractérisation des phases issues du dragage (Bortone et *al.*, 2004).

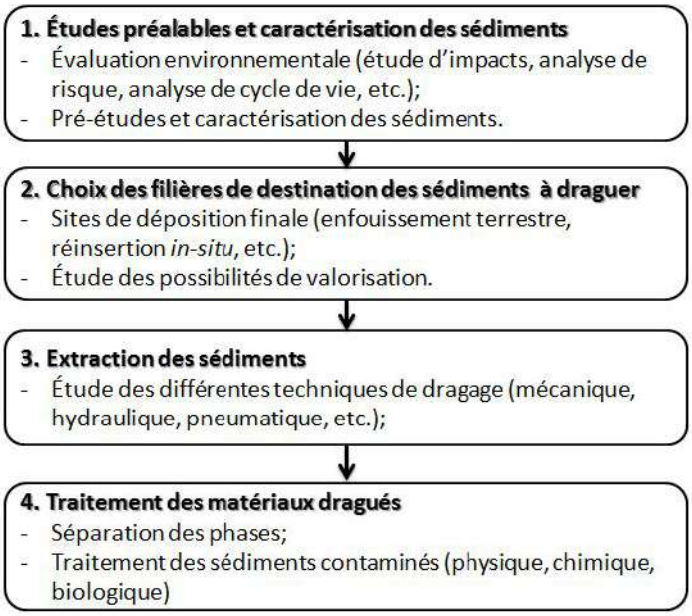


**Figure 30: Éléments à considérer pour le dragage de sédiments contaminés**

Les caractéristiques techniques pour chacun des sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin sont d'abord décrites en détails au tableau 19 : le mode de dragage, le volume de sédiments à extraire, l'élimination des sédiments après extraction (prétraitement, stockage, transport) de même que les volumes requis de sable et de pierre calcaire pour le procédé de recouvrement actif y sont présentés. Des informations relatives à la durée des travaux, aux performances espérées en termes de rabattement de phosphore, à la durabilité, à la remise en suspension des sédiments, au degré de faisabilité de chaque sous-scénario, etc. sont également présentées.

Suite à la présentation des caractéristiques techniques de chaque sous-scénario au tableau 19, une discussion complémentaire est réalisée pour chaque composante de ce tableau. Les données utilisées pour construire le tableau 19 sont tirées des références du tableau 18 et ont été adaptées en fonction de chaque sous-scénario. Certaines caractéristiques présentées au tableau 19 ont déjà été abordées dans la description des sous-critères techniques à la section 3.3.2. C'est le cas notamment pour la durabilité de la solution, la faisabilité de la solution et la remise en suspension des sédiments/potentiel de relargage des contaminants.

**Tableau 19: Caractéristiques techniques des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin**

| Scénarios / Caractéristiques techniques | Déplacement des sédiments contaminés vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | Traitement des zones prioritaires | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **A1** | **A2** | **B1** | **B2** | **C1** | **C2** | **D** |
| **Méthode de dragage** | Mécanique | hydraulique | aucun | hydraulique | hydraulique | mécanique | aucun |
| **Zones de dragage** | Zones I, III et IV | Zones I, III et IV | - | Zones I à IV | Zones I, III et IV | Zones I, III et IV | - |
| **Épaisseur de sédiments dragués (m)** | 0,30 | 0,30 | 0 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0 |
| **Volume de sédiments à draguer ($m^3$)** | 101439 | 101439 | 0 | 149526 | 101439 | 101439 | 0 |
| **Disposition finale des sédiments dragués** | lac - fosse centrale | lac - fosse centrale | - | confinement terrestre ou valorisation | confinement terrestre ou valorisation | confinement terrestre ou valorisation | - |
| **Transport des sédiments une fois extraits** | Barge | conduite | aucun | conduites/ camions | conduites/ camions | barge/camions | - |
| **Nombre de voyages par camion requis pour les sédiments** | 0 | 0 | 0 | 143 | 97 | 97 | 0 |
| **Prétraitement : séparation des phases** | Aucun | aucun | aucun | polymérisation + sac filtrant | polymérisation + sac filtrant | bassin de décantation | - |

| Scénarios / Caractéristiques techniques | Déplacement des sédiments contaminés vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | Traitement des zones prioritaires | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **A1** | **A2** | **B1** | **B2** | **C1** | **C2** | **D** |
| **Empreinte au sol pour les unités de prétraitement** | - | - | - | < 6,3 ha | < 6,3 ha | ≈ 5,1 ha | - |
| **Sites considérés pour les unités de prétraitement (figure 31)** | - | - | - | 1 et 2 | 1 et 2 | 2 et 4 | - |
| **Structures requises** | Chemin d'accès | Chemin d'accès | Chemin d'accès et quai de chargement | Chemin d'accès Terrain pour les sacs filtrants® et l'unité de polymérisation | Chemin d'accès Terrain pour les sacs filtrants et l'unité de polymérisation | Chemin d'accès Terrain - bassin de décantation Zone de décharge - sédiments dragués | aucune |
| **Durée des travaux de dragage**[8] | 166 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | 160 jours à 10 heures par jour | - | 240 jours à 10 heures par jour | 160 jours à 10 heures par jour | 166 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | - |
| **Recouvrement actif** | Zone II | Zone II | Zones I à IV | Zone II | Zone II | Zone II | aucun |
| **Épaisseur de calcaire appliqué (m)** | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0 | 0,10 | 0,10 | 0 |
| **Volume de calcaire appliqué (m³)**[9] | 16029 | 16029 | 49842 | 0 | 16029 | 16029 | 0 |
| **Épaisseur de sable appliqué (m)** | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0 | 0,10 | 0,10 | 0 |

[8] Dragage mécanique : Tiré de USEPA, 2010 ; Dragage hydraulique : Tiré d'un entretien avec Jocelyn Douheret de Terratube.
[9] Masse volumique : 1500 kg/m³, granulométrie entre 10 mm et 14 mm.

| Scénarios / Caractéristiques techniques | Déplacement des sédiments contaminés vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | Traitement des zones prioritaires | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **A1** | **A2** | **B1** | **B2** | **C1** | **C2** | **D** |
| **Volume de sable appliqué (m³)**[10] | 16029 | 16029 | 49842 | 0 | 16029 | 16029 | 0 |
| **Transport des matériaux pour le recouvrement actif** | camions/barge/ canon à sable | camions/barge/ canon à sable | camions/barge/ canon à sable | - | camions/barge/ canon à sable | camions/barge/ canon à sable | - |
| **Durée des travaux de mise en place des matériaux de recouvrement**[11] | 53 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | 53 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | 163 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | - | 53 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | 53 jours à 12 heures par jour (612 m³/j) | - |
| **Durée totale des travaux**[12] | 219 jours | 213 jours | 163 jours | 240 jours | 160 jours | 166 jours | - |
| **Durabilité de la solution** | > 100 ans pour le dragage ≈ 30 ans pour le recouvrement actif | > 100 ans pour le dragage ≈ 30 ans pour le recouvrement actif | ≈ 30 ans pour le recouvrement actif | > 100 ans pour le dragage | > 100 ans pour le dragage ≈ 30 ans pour le recouvrement actif | > 100 ans pour le dragage ≈ 30 ans pour le recouvrement actif | - |
| **Rabattement de phosphore** | ≈ 25% | ≈ 85% | 95% | 90% | 92% | 30% | < 0% |
| **Remise en suspension des sédiments et potentiel de relargage des contaminants** | Très élevée | Élevée | Faible | Moyenne | Moyenne | Élevée | - |

[10] Masse volumique : 1850 kg/m³
[11] Tirée de USEPA, 2010
[12] La mise en place du matériau de recouvrement s'effectue après la réinsertion des sédiments des zones I, III et IV pour le scénario A.

| Scénarios / Caractéristiques techniques | Déplacement des sédiments contaminés vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | Traitement des zones prioritaires | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **A1** | **A2** | **B1** | **B2** | **C1** | **C2** | **D** |
| **Faisabilité au lac Saint-Augustin** | Difficile : Technique de dragage pas adaptée. Études de toxicité des sédiments requises | Moyenne : Études de toxicité des sédiments requises | Facile | Facile | Facile | Difficile : Technique de dragage peu adaptée | - |
| **Mesure d'atténuation requise** | Rideau de turbidité | Rideau de turbidité | - | - | - | Rideau de turbidité | - |
| **Zones où les mesures d'atténuation sont requises** | Zones I à IV | Zone II | - | - | - | Zones I, III et IV | - |

Le lecteur est invité à consulter en tout temps l'annexe G pour des exemples de calculs. Celui-ci est également invité à se référer au tableau 19 en tout temps pour le récapitulatif des détails techniques des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés spécialement construits pour le cas du lac Saint-Augustin. Plusieurs des éléments y figurant seront repris et discutés jusqu'à la fin du chapitre 4.

### 4.1.2 Justifications des caractéristiques techniques

Alors que la coagulation du phosphore particulaire dans l'eau suivie du recouvrement actif des sédiments à l'aide d'une couche de pierre calcaire et de sable permet d'atteindre un enlèvement allant jusqu'à 95 % du phosphore soluble (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011), les méthodes de dragage hydraulique et mécanique atteignent respectivement des performances de l'ordre de 90 % et de 0 %, deux mois après l'application du procédé. En effet, les concentrations en phosphore soluble ont augmenté de 205 % après le dragage mécanique des sédiments à l'échelle pilote au cours de l'été 2011 (Constantin et *al.*, 2012).

Les performances techniques de chaque sous-scénario pour l'enlèvement du phosphore soluble dans l'eau sont calculées en faisant une moyenne pondérée des performances attendues sur les superficies corrigées des zones à haute contamination où il y a application d'un procédé. Les zones du lac non-touchées par un procédé de traitement mais néanmoins contaminées ne sont donc pas considérées dans le calcul de la performance attendue pour chaque sous-scénario puisqu'elles sont invariables d'un sous-scénario à l'autre. De plus, pour les sous-scénarios où il y a réinsertion des sédiments contaminés dans la fosse centrale après dragage (A), la performance est légèrement revue à la baisse par rapport au cas où les sédiments extraits sont valorisés à l'extérieur du lac (C). Par exemple, le sous-scénario C1 présente 338 130 m² de superficie draguée hydrauliquement et 160 290 m² où il y a recouvrement actif. La performance se calcule comme suit :

$$Performance\ de\ C1 = \frac{(338130\ m^2 \times 90\%) + (160290\ m^2 \times 95\%)}{(338130\ m^2 + 160290\ m^2)} = 91{,}6\ \%$$

Plusieurs types de dragues peuvent accomplir un dragage mécanique ou hydraulique. En effet, les dragues mécaniques usuelles, à benne preneuse, à godet, pelleteuse, niveleuse et à cuiller permettent d'accomplir un dragage mécanique des sédiments. Les dragues suceuse, suceuse désagrégeuse, suceuse à tête d'élinde articulée, suceuse porteuse, etc. sont plutôt associées au dragage hydraulique. Il existe aussi des modèles spécialement conçus pour répondre aux contraintes environnementales associées à l'extraction de matériaux contaminés. Certaines compagnies sont d'ailleurs spécialisées dans ce domaine (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004 ; Palermo, 1991).

Au Québec, les compagnies Eco Technologies, Terratube, Dragage Verreault et Marine International Dragage possèdent les équipements nécessaires pour accomplir le dragage de sédiments contaminés. Certaines entreprises d'excavation peuvent être approchées pour le dragage mécanique avec la méthode usuelle impliquant une pelle mécanique.

Au lac Saint-Augustin, les dragues mécaniques usuelles et à benne preneuse sont envisagées pour les sous-scénarios de dragage mécanique (A1 et C2) et la drague suceuse est retenue pour les sous-scénarios de dragage hydraulique (A2, B2 et C1). Le choix de ces dragues est cohérent avec les outils de dragage utilisés dans le volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin pour lesquels des résultats à l'échelle pilote sont disponibles (Constantin et *al.*, 2012). Le tableau 20 présente quelques spécificités techniques pour ces types de drague (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004).

**Tableau 20: Spécificités techniques des types de dragues envisagées au lac Saint-Augustin****

| Types de drague | Dragage mécanique | | Dragage hydraulique |
|---|---|---|---|
| | à benne preneuse | dragage mécanique usuel | drague suceuse |
| **Profondeur maximum (m)** | 40 | 25 | 60 |
| **Précision d'enlèvement (cm)** | 30 à 50 | Bonne en eaux peu profondes | 10 à 20 |
| **Rendement ($m^3/h$)** | 100 à 2000 | < 500 | 50 à 5000 |
| **Remise en suspension** | Importante | Importante | Moyenne |

** Données tirées de l'Agence de l'eau Artois-Picardie (2004)

La détermination des volumes de sédiments à draguer ou des matériaux de recouvrement à appliquer (sable et pierre calcaire) est réalisée à l'aide des superficies corrigées du tableau 14 qui tiennent compte de la bathymétrie du lac Saint-Augustin. L'épaisseur considérée pour les matériaux de recouvrement correspond à celle appliquée lors du volet 1 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2011). Une épaisseur à draguer de 10 cm est suffisante pour le dragage des sédiments puisqu'il a été démontré lors d'essais de diffusion que le potentiel de relargage en phosphore est plus élevé dans la couche de sédiment récente, en comparaison avec la couche plus profonde. L'enlèvement de la couche récente serait donc suffisant pour contrôler l'apport interne en phosphore provenant des sédiments par relargage (Constantin et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2010). Toutefois, l'épaisseur à considérer pour le dragage doit

tenir compte des limites de précision des équipements de dragage mécanique et hydraulique. Une épaisseur moyenne à draguer de 30 centimètres a donc été retenue dans les détails techniques des sous-scénarios présentés au tableau 19.

L'échéancier régissant l'exécution des travaux au lac Saint-Augustin doit tenir compte de la période hivernale qui s'étend de décembre à avril. Les travaux de gestion des sédiments contaminés peuvent donc être réalisés de mai à novembre sans problèmes, à raison de 10 ou 12 heures par jour et 5 jours par semaine (Ville de Québec, 2009). Bien entendu, la durée des travaux est liée au volume de sédiments à extraire ainsi qu'au volume des matériaux de recouvrement à mettre en place.

Les durées estimées au tableau 19 pour les travaux de dragage hydraulique des sédiments proviennent d'un entretien réalisé avec Jocelyn Douheret de Terratube. Les durées présentées pour les travaux de dragage mécanique et d'application du matériau de recouvrement actif ont été calculées en considérant un débit d'extraction ou d'application de 800 cy/j (612 $m^3$/j) à raison de 12 h/j (USEPA, 2010). À la lumière des durées totales présentées au tableau 19 en fonction des durées requises par procédé et en considérant que des imprévus peuvent survenir, les travaux devraient facilement pouvoir s'exécuter à l'intérieur d'une période de 2 ans pour l'ensemble des sous-scénarios.

Comme le taux de renouvellement des eaux est faible au lac Saint-Augustin, le débit de pompage des sédiments doit être réglé de manière à ne pas causer une diminution trop importante du niveau d'eau. De plus, comme les travaux de pompage se réalisent sur une période de 2 ans, l'effet gel-dégel permet de stocker un volume additionnel de sédiments dans les sacs filtrants remplis l'année précédente. Les sacs filtrants pouvant être utilisés pour la séparation des phases solide et liquide après polymérisation des boues pompées ont une circonférence de 27,43 m et une longueur de 30,50 m (Ville de Québec, 2009).

La question de la gestion des sédiments contaminés après les opérations de dragage doit être abordée pour les sous-scénarios B2, C1 et C2. Dans le cas où les sédiments dragués ne sont pas réinsérés dans la fosse centrale, ceux-ci doivent être disposés, traités ou valorisés en bordure du lac ou aux environs du site d'extraction. Certains sites ont déjà été identifiés dans une analyse technico-économique concernant l'extraction, le traitement et la

disposition des sédiments du lac Saint-Augustin pour un entreposage temporaire ou définitif du matériau dragué. Ceux-ci sont illustrés à la figure 31 et leurs caractéristiques détaillées sont résumées au tableau 21 (Ville de Québec, 2009).

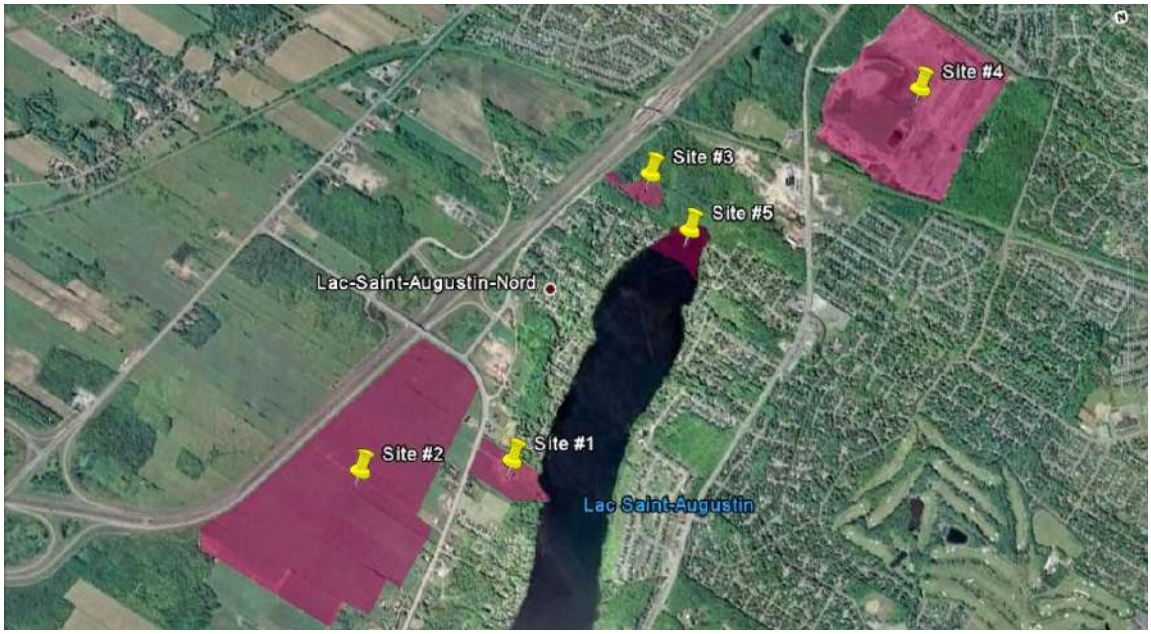


**Figure 31: Sites potentiels pour le traitement des sédiments (Adapté de Ville de Québec, 2009)**

**Tableau 21: Caractéristiques des sites potentiels pour le traitement des sédiments contaminés****

| Site # | Superficie (ha) | Disposition définitive des sédiments | Types de terrain | Informations supplémentaires |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 4,6 | | Privé | Peu/pas de transport requis pour les sédiments;<br>Diminution des coûts de pompage: zone en bordure du lac. |
| **2** | 63,5 | X | Agricole | Secteur suggéré par la ville de Saint-Augustin-de-Desmaures;<br>Site situé à environ 350 mètres du lac;<br>Coûts supplémentaires à prévoir pour les conduites. |
| **3** | 1,6 | | Forêt | Secteur non-aménagé et non-exploité ;<br>Site situé à environ 100 mètres du lac ;<br>Possibilité d'accroître la superficie du site en déboisant. |
| **4** | 37,5 | X | Écocentre | Site situé à 640 mètres du lac ;<br>Coûts supplémentaires pour les conduites ;<br>Divers aménagements à prévoir pour la protection des conduites traversant les routes et la voie ferrée. |
| **5** | 3,0 | | Lac | Construction d'un batardeau et rideaux de turbidité requis. |

** Informations tirées de Ville de Québec, 2009

Les sites 1 à 4 du tableau 21 peuvent être utilisés pour le prétraitement des sédiments contaminés visant à séparer les phases liquide et solide issues du dragage. De ces sites, les sites 2 et 4 peuvent être retenus pour un entreposage définitif des sédiments contaminés. Certains sites sont situés très près du lac, ce qui entraîne une diminution des coûts associés à l'installation des conduites nécessaires au dragage hydraulique et aux équipements assurant leur protection (Ville de Québec, 2009). Dans le cas où les sédiments dragués ne sont pas réinsérés dans la fosse centrale du lac, ceux-ci doivent être valorisés après l'étape du prétraitement. Les sites présentés doivent donc être aménagés de manière à assurer la superficie nécessaire à l'installation des structures de stockage tout en favorisant une séparation efficace des phases par filtration des boues à travers un sac filtrant ou par sédimentation selon qu'il s'agit du dragage hydraulique ou du dragage mécanique. Les options disponibles incluent donc l'épandage temporaire ou définitif sur l'un des sites présentés à la figure 31 ou la réutilisation comme matériau de recouvrement.

Dans le cas du dragage hydraulique, il est possible d'empiler les sacs filtrants de façon à former une pyramide. Une empreinte au sol de 6.3 ha a déjà été calculée pour l'enlèvement de 700 000 m³ de sédiments contaminés (Ville de Québec, 2009). Cette empreinte est forcément moindre si le volume de sédiments à draguer est plus faible, ce qui est le cas pour l'ensemble des sous-scénarios présentés ici (A2 et C1). Les sites 1 et 2 de la figure 31 peuvent donc être facilement envisagés comme sites de prétraitement pour le dragage hydraulique puisqu'elles offrent une superficie suffisante tout en étant situées très près des zones d'extraction. Le site 4 n'a pas été sélectionné en raison de son éloignement par rapport au site d'extraction.

Les eaux qui s'écoulent à travers le sac filtrant après polymérisation et filtration des sédiments dragués hydrauliquement ont été caractérisées dans le cadre de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin. Le protocole suivi, les expériences réalisées, les équipements utilisés de même que les résultats préliminaires issus de ces expériences en laboratoire sont d'ailleurs présentés en détails à l'annexe F. Selon les résultats préliminaires obtenus (section F.4), les concentrations retrouvées en cadmium, en cuivre, en plomb et en zinc dans les eaux qui s'écoulent à travers le sac filtrant sont sous les limites de détection respective de chacun de ces éléments. L'aluminium dissous n'a pas été caractérisé dans les

eaux qui s'écoulent à travers le sac filtrant parce que le polymère utilisé n'en contient pas. Par ailleurs, la concentration retrouvée en phosphore soluble est inférieure à 10 µg/L. De plus, les résultats obtenus dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin réalisé en 2011 indiquent que l'enlèvement des particules en suspension entre l'entrée et la sortie du sac filtrant est de 98 %. En effet, la concentration des particules en suspension à la sortie du filtre était de 2,4 mg/L, ce qui est nettement inférieur à la valeur moyenne de 8,8 mg/L observée en 2011 au lac Saint-Augustin. Enfin, les boues retenues par le sac filtrant ont une siccité de 35 % (Constantin et *al.*, 2012). Les eaux s'écoulant à travers le filtre peuvent donc être retournées directement au lac Saint-Augustin sans traitement supplémentaire pour le cas du dragage hydraulique avec polymérisation/filtration des sédiments pompés.

Dans le cas du dragage mécanique (A1 et C2), la séparation des phases solide et liquide est réalisée par décantation dans un bassin dimensionné et spécialement construit à proximité des zones d'extraction. Le bassin doit être en mesure d'accueillir les 101 439 m³ de sédiments dragués mécaniquement du sous-scénario C2 dans le cas d'un entreposage définitif. Avec une profondeur de 2 mètres, l'empreinte au sol d'un tel bassin est environ de 5,07 ha et seuls les sites 2 et 4 de la figure 31 offrent l'espace suffisant. Si toutefois le bassin est conçu pour un entreposage temporaire et en admettant que les travaux de dragage soient également répartis sur 2 étés, le volume du bassin serait deux fois moindre tout comme le serait son empreinte au sol.

La performance d'un bassin de sédimentation augmente avec le temps de rétention hydraulique de l'eau et peut être considérablement améliorée avec l'ajout d'un agent coagulant ou floculant dans l'eau (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004 ; Metcalf & Eddy, 2003). Un essai de sédimentation a été réalisé dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin avec les sédiments dragués mécaniquement au lac Saint-Augustin. Le critère pour la protection de la vie aquatique (effet chronique) autorise une augmentation de 5 mg/L des matières en suspension (MES) par rapport à la concentration moyenne retrouvée au lac Saint-Augustin qui était de 8,8 mg/L en 2011. Après 15 jours de décantation, la teneur en MES dans le surnageant était de 11,8 mg/L. La qualité de l'eau est donc suffisante en termes de MES pour être retournée au lac. De plus,

les concentrations retrouvées en phosphore soluble sont sous la limite de détection de la méthode utilisée (10 µg/L). Enfin, la siccité des boues après 15 jours de décantation est de 30 % (Constantin et *al.*, 2012).

Le transport par camion doit également être prévu si les sédiments sont valorisés après leur extraction. Un chargeur peut être utilisé pour le chargement des sédiments et le transport peut être réalisé à l'aide d'un fardier trois essieux ayant une capacité de 50 tonnes. Si 700 voyages de fardiers sont requis pour le transport de 736 379 m³ de sédiments dragués (Ville de Québec, 2009), approximativement 143 et 97 voyages sont nécessaires respectivement pour le transport des 149 526 m³ de B2 et des 101 439 m³ de C1 et C2.

Enfin, le dragage mécanique et la réinsertion des sédiments contaminés dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin sont des procédures qui requièrent la mise en place de mesures d'atténuation visant à limiter l'impact négatif de la remise en suspension des sédiments pendant l'exécution des travaux sur le milieu récepteur. Pour ce faire, des rideaux de turbidité peuvent être installés de manière à isoler la zone où il y a exécution des travaux. Les rideaux de turbidité doivent être installés de la surface en laissant un espace de 12 à 18 pouces entre le fond du lac et le bas du rideau de manière à permettre un écoulement des eaux. Ces renseignements ont été obtenus à la suite d'un entretien téléphonique avec M. Harold Grenier de la compagnie Texel Géosol. Il faut noter que les rideaux de turbidité peuvent aussi être mis en place pour le dragage hydraulique. Cependant, ceux-ci ne sont pas nécessaires puisque la remise en suspension des sédiments pour le dragage hydraulique est moindre que pour le dragage mécanique.

Dans le cas des sous-scénarios utilisant le recouvrement actif des sédiments contaminés, l'application du matériau de recouvrement doit se faire de manière à minimiser la remise en suspension des sédiments. Pour ce faire, le matériau de recouvrement doit être appliqué le plus près possible de l'interface eau-sédiment. L'application peut se faire à l'aide d'une pelle mécanique, d'une benne ou d'une barge. La modification d'équipements normalement utilisés pour le dragage des sédiments peut également être envisagée pour l'application du matériau de recouvrement (Lyons et *al.*, 2006 ; Fredette and French, 2004 ; Zeman, 1994). Dans les sous-scénarios du tableau 19, la livraison des matériaux de recouvrement est prise en charge directement par les fournisseurs.

## 4.2 L'évaluation économique des scénarios

L'évaluation économique des scénarios/sous-scénarios comprend l'investissement initial associé à la mise en œuvre de chacun des scénarios/sous-scénarios à grande échelle, les coûts associés aux mesures d'atténuation, les coûts de disposition/valorisation des sédiments dragués de même que les coûts associés à l'entretien et au suivi des solutions. Bien entendu, l'évaluation économique de chaque scénario/sous-scénarios est réalisée en prenant en compte les caractéristiques techniques précédemment décrites. Ainsi, les chiffres qui sont présentés dans cette section sont adaptés aux scénarios/sous-scénarios proposés dans le cadre de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin.

### 4.2.1 L'investissement initial

L'investissement initial à réaliser pour chaque sous-scénario comprend les coûts directs associés aux opérations de dragage, le coût associé aux équipements de stockage et de prétraitement des sédiments une fois extraits de même que les coûts de transport si besoin est. Les coûts de transport sont fonction de la distance à parcourir et du nombre de voyages requis. Pour les besoins de l'étude, une distance de 25 km a été choisie pour l'estimation des coûts de transport (Ville de Québec, 2009). Pour le recouvrement actif, l'investissement initial comprend les coûts des matériaux et de leur transport jusqu'au site de même que les coûts de mise en place.

Le tableau 22 présente l'investissement initial à réaliser pour chaque sous-scénario. Les coûts associés aux honoraires professionnels, les taxes et les coûts associés aux diverses demandes de permis et d'autorisations ne sont pas inclus dans les résultats de cette évaluation économique de l'investissement initial de chaque scénario/sous-scénario proposé au lac Saint-Augustin.

**Tableau 22: Données économiques pour l'investissement initial des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin**

| Traitement | Scénarios | Déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | Traitement des zones prioritaires | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D |
| | Unité | $ | $ | $ | $ | $ | $ | $ |
| Dragage hydraulique | Opérations de dragage | 0 | 1 250 000 | 0 | 1 750 000 | 1 250 000 | 0 | 0 |
| | Sacs filtrants, membranes du lit de drainage, unités de polymérisation, polymère et main d'œuvre | 0 | 387 200 | 0 | 2 310 000 | 1 650 000 | 0 | 0 |
| | Coûts de transport après séparation des phases solide/liquide | 0 | 0 | 0 | 225 000 | 152 000 | 0 | 0 |
| Dragage mécanique | Opérations de dragage @ 15€/m³ (20.85$/m³) | 2 115 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 115 000 | 0 |
| | Coûts des structures requises pour le dragage | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 000 | 0 |
| | Coûts de transport après séparation des phases solide/liquide | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 152 000 | 0 |
| Recouvrement actif | Coûts associés à l'alun @ 0.30$/m² pour dosage à 20 - 30 mg/L | 36 990 | 36 990 | 115 020 | 0 | 36 990 | 36 990 | 0 |
| | Coûts en sable @ 9.50$/t.m. - Transport inclus | 281 713 | 281 713 | 875 976 | 0 | 281 713 | 281 713 | 0 |
| | Coûts en calcaire @ 13.75$/t.m. | 330 605 | 330 605 | 1 027 991 | 0 | 330 605 | 330 605 | 0 |
| | Coûts de transport - pierre calcaire @ 6.90$/t.m. | 166 318 | 166 318 | 515 865 | 0 | 166 318 | 166 318 | 0 |
| | Coûts de mise en place | 746 120 | 746 120 | 2 314 280 | 0 | 746 120 | 746 120 | 0 |
| | **TOTAL DES COÛTS** | **3 676 746** | **3 198 946** | **4 849 132** | **4 285 000** | **4 613 746** | **4 078 746** | **0** |

Les coûts unitaires retenus pour construire le tableau 22 proviennent de soumissions, d'entretiens téléphoniques et d'une revue de la littérature pour des projets similaires de gestion des sédiments contaminés. La revue de la littérature a permis de procéder à une validation des coûts retenus pour l'évaluation économique des scénarios proposés dans ce projet de maîtrise. En effet, des coûts similaires sont retrouvés d'une source à l'autre, ce qui suggère une certaine robustesse des données économiques. Les personnes consultées par téléphone ainsi que leurs coordonnées sont montrées au tableau 23.

**Tableau 23: Personnes contactées pour les estimations des coûts**

| Nom | Organisme | Téléphone |
|---|---|---|
| **Jean-Philippe Gravel** | Carrière Union ltée | (418)-628-3464 |
| **Sébastien Savard** | Construction & pavage Portneuf inc. | (418)-268-3558 #230 |
| **Paul Laplante** | Eco Technologies | (506)-726-6073 |
| **Jocelyn Douheret** | Terratube | (819)-846-3642 |
| **Harold Grenier** | Texel Géosol | (418)-658-0200 |

Les chiffres présentés pour le dragage hydraulique et pour le prétraitement combinant polymérisation/filtration des boues pompées à travers un sac filtrant proviennent d'estimations fournies par Jocelyn Douheret de Terratube en octobre 2011. Les coûts retenus pour le transport des sédiments après séparation des phases solide et liquide proviennent du rapport de la ville de Québec (2009) et ont été adaptés aux volumes de sédiments à transporter pour chaque sous-scénario de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Lorsqu'il y a dragage hydraulique des sédiments avec réinsertion dans la fosse centrale (A2), seul le coût de la main-d'œuvre est considéré. Le coût utilisé pour la main-d'œuvre est de 2420 $ par quart de travail à raison de 4 personnes par quart (Ville de Québec, 2009) et pour une durée totale de 160 jours (tableau 19). Les coûts de main-d'œuvre sont inclus dans les opérations de dragage pour le dragage mécanique.

Le coût retenu pour les opérations de dragage mécanique des sédiments est de 15 €/m³ (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). En considérant un taux de change moyen de 1,39 $CN/€ en 2011, le coût au mètre cube revient à 20,85 $CN/m³ pour ce type de drague. En comparaison, une valeur de 16 $CN/m³ a été utilisée dans une autre étude pour le dragage mécanique des sédiments au lac Saint-Augustin (Consortium DDM – ProFaune, 2005). La valeur la plus élevée a été retenue pour le calcul des coûts de dragage. Toutefois,

celle-ci est fortement dépendante du taux de change en vigueur. Le coût des structures requises pour le dragage mécanique inclut l'aménagement d'un bassin de sédimentation, la construction d'un chemin d'accès, les coûts de nivellement, etc. Les coûts associés au transport des sédiments après séparation des phases solide et liquide sont issus d'une analyse technico-économique antérieure portant sur l'extraction, le traitement et la disposition des sédiments du lac Saint-Augustin et ont été adaptés aux volumes de sédiments considérés dans chaque sous-scénario (Ville de Québec, 2009).

Tous les sous-scénarios à l'exception de B2 incluent la mise en place d'un recouvrement actif sur les sédiments contaminés. Le coût retenu pour un traitement de l'eau à l'alun à un dosage de 20-30 mg/L est de 0,30 $/m² (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Les coûts associés aux matériaux et à leur transport proviennent d'entretiens téléphoniques réalisés avec Jean-Sébastien Savard de Construction & Pavage Portneuf inc. et Jean-Philippe Gravel de Carrière Union ltée. Le coût retenu pour le sable est de 9,50 $/tonne et inclut le transport. La pierre calcaire dont la granulométrie oscille entre 10 et 14 mm se vend 13,75 $/tonne et il faut rajouter 6,90 $/tonne pour son transport. Les masses requises de pierre calcaire et de sable pour chaque sous-scénario ont été calculées à partir des volumes requis pour ces matériaux[13] en considérant des masses volumiques de 1500 kg/m³ et 1850 kg/m³ pour la pierre calcaire et le sable respectivement.

Les coûts de mise en place du matériau de recouvrement actif proviennent d'une estimation pour un projet similaire dont les détails économiques ont été rendus publics par *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2010). Suivant les hypothèses réalisées dans le document de l'USEPA, un coût journalier de 14 200 $CN a été considéré pour le cas du lac Saint-Augustin à raison de 12 heures de travail par jour et un débit d'application du matériau de recouvrement de 612 m³/j (800 cy/j). Rappelons que des exemples de calcul peuvent être consultés à l'annexe G.

### 4.2.2 Les mesures d'atténuation

La mise en place de rideaux de turbidité est une mesure d'atténuation dont la fonction est de limiter l'impact négatif de la remise en suspension des sédiments pendant les opérations

[13] Ces volumes ont été présentés dans les caractéristiques techniques au tableau 19.

de dragage mécanique ou pendant la réinsertion des sédiments dragués dans le milieu récepteur. Ces mesures sont requises notamment pour les sous-scénarios A1, A2 et C2.

Le détail des coûts pour la mise en place de rideaux de turbidité est montré au tableau 24 et fait suite à un entretien téléphonique réalisé avec M. Harold Grenier de la compagnie Texel Géosol. Ce tableau présente également les noms commerciaux de même que les coûts unitaires pour des rideaux de dimensions standards en industrie. Tous les rideaux de turbidité sont vendus en longueurs de 15 mètres et le chiffre figurant dans le nom commercial de chaque rideau correspond à sa profondeur maximale en pieds. Les longueurs totales requises ont été approximées dans une carte GoogleEarth© et les profondeurs considérées sont issues de la bathymétrie du lac Saint-Augustin. Dans le cas du sous-scénario A1, les coûts des zones II et III ont été jumelés ensemble. Cette initiative se justifie par le fait que ces deux zones sont voisines et qu'une remise en suspension importante y est générée soit par dragage mécanique, soit par la réinsertion des sédiments contaminés provenant des autres zones où il y a dragage mécanique.

**Tableau 24: Données économiques pour la mise en place de rideaux de turbidité**

| # Zone | Zone I | Zone II | Zone III | Zone IV | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Nom commercial** | FSC7<br>FSC13 | FSC19 | FSC19 | FSC19 | |
| **Coûts unitaires ($)** | 450<br>600 | 715 | 715 | 715 | |
| **Longueur requise (m)** | 300<br>375 | 765 | 735 | 675 | |
| **Nombre de rideaux requis** | 20<br>25 | 51 | 49 | 45 | **Total ($)** |
| **A1 ($)** | **24 000** | **36 465** | | **32 175** | **92 640** |
| **A2 ($)** | **0** | **36 465** | **0** | **0** | **36 465** |
| **C2 ($)** | **24 000** | **0** | **35 035** | **32 175** | **91 210** |

### 4.2.3 Les coûts associés à la disposition/valorisation des sédiments

La réinsertion des sédiments extraits par dragage dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin est considérée comme un moyen de disposition final du matériau dragué (A1 et A2). Dans le cas où les sédiments extraits sont prétraités et stockés en bordure du lac (B2, C1 et C2), la filière de valorisation considérée est l'utilisation des sédiments dragués

comme matériau de remblaiement (MDDEP, 2011b ; Consortium DDM – ProFaune, 2005). Les coûts associés à la disposition et à la valorisation des sédiments doivent être néanmoins inclus dans les données économiques. Le tableau 25 présente un sommaire de ces coûts adaptés pour chacun des scénarios/sous-scénarios proposés au lac Saint-Augustin.

Les coûts considérés pour la réinsertion des sédiments extraits ou pour leur utilisation comme matériau de remblaiement sont respectivement de 4,58 €/m³ et 7,63 €/m³. Il s'agit de valeurs minimales excluant les coûts de transport pouvant être revues à la hausse (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). En considérant un taux de change moyen de 1,39 $CN/€, ces valeurs deviennent respectivement 6,37 $CN/m³ et 10,61 $CN/m³. Ce sont ces valeurs en monnaie canadienne qui sont utilisées pour l'évaluation des coûts de valorisation/disposition des sédiments dragués en fonction des caractéristiques techniques de chaque sous-scénario. Les coûts de valorisation/disposition des sédiments dragués du tableau 25 pourraient devoir être revus à la hausse advenant une fluctuation dans le taux de change.

En 1991, les coûts de réinsertion de sédiments en mer pour la région de New York et du New Jersey étaient de 5 $ US/cy. Cette valeur unitaire doit cependant être actualisée afin de pouvoir être comparée aux chiffres présentés au tableau 25. Un taux d'inflation correspondant à la moyenne de 4,44 % observée au Canada de 1979 à 1998 (Park et *al.*, 2002) a donc été choisi pour l'actualisation de certaines données économiques. En utilisant ce taux d'actualisation conservateur de 4,44 % sur 20 ans, en effectuant les conversions appropriées et en assumant une parité entre les dollars américains et canadiens, le coût de réinsertion des sédiments en 2011 serait de 11,92 $/m³ (Del Vicario, s.a). En 1993, les coûts de disposition des sédiments dragués dans une zone de confinement *ex-situ* oscillaient entre 5 et 20 $ US/cy. En appliquant un taux d'actualisation conservateur de 4,44 % sur 18 ans, en effectuant les conversions appropriées et en assumant une parité entre les dollars américains et canadiens, on obtient 10,93 $/m³ et 43,72 $/m³ (USEPA, 1993). Il est donc moins dispendieux de valoriser les sédiments extraits que d'en disposer dans une cellule de confinement.

**Tableau 25: Données économiques pour les coûts relatifs à la valorisation des sédiments contaminés après dragage**

| Traitement | Scénarios | Déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | Traitement des zones prioritaires | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | Statu quo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D |
| Unité | | $ | $ | $ | $ | $ | $ | $ |
| Dragage hydraulique | Coûts associés à la valorisation des sédiments après dragage | 0 | 0 | 0 | 1 585 828 | 1 075 832 | 0 | 0 |
| | Coûts associés à la réinsertion in-situ des sédiments après dragage | 0 | 645 781 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dragage mécanique | Coûts associés à la valorisation des sédiments après dragage | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 075 832 | 0 |
| | Coûts associés à la réinsertion in-situ des sédiments après dragage | 645 781 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | **TOTAL DES COÛTS** | **645 781** | **645 781** | **0** | **1 585 828** | **1 075 832** | **1 075 832** | **0** |

### 4.2.4 Les coûts d'entretien et de suivi

Enfin, les coûts relatifs à l'entretien et au suivi de chacun des sous-scénarios doivent être estimés. Pour ce faire, un plan d'entretien et de suivi pour les différents scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés doit d'abord être construit. Les principaux éléments que devrait inclure le plan d'entretien et de suivi d'un projet de gestion des sédiments contaminés sont résumés au tableau 26 et sont tirés de la littérature environnementale (Ryding and Rast, 1994) et de la littérature portant sur l'entretien et le suivi requis sur des projets similaires de gestion des sédiments contaminés (USACE, 2008 ; USACE, 2005 ; Zeman, 1994).

La tarification horaire utilisée au tableau 26 est tirée des grilles de tarification du Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec (CEAEQ) pour l'échantillonnage et l'analyse des échantillons et varie selon le niveau de compétence requis pour effectuer chaque élément du suivi. Selon cette grille, un technicien coûte 43,54 $/h et un professionnel coûte 65,33 $/h. La tarification utilisée est celle en vigueur pour l'année 2011 (MDDEP, 2011c). Le statu quo n'est pas considéré dans les options du tableau 26 puisqu'aucune mesure d'entretien et de suivi n'est requise pour ce scénario. Il faut cependant prendre en considération que le coût de l'inaction engendre des pertes économiques qui se traduisent par un entretien additionnel et intensif du plan d'eau malade (Dodds et *al.*, 2009).

Les tarifs retenus pour les analyses à effectuer en laboratoire sur les échantillons d'eau et de sédiments à prélever dans le cadre du plan d'entretien et de suivi proposé au lac Saint-Augustin sont ceux de l'Association des Consultants et Laboratoires Experts pour l'année 2011. Ces coûts sont sujets à des variations annuelles (ACLE, 2011) et sont détaillés au tableau 27 par type d'échantillons et pour chaque paramètre à suivre dans le cadre d'un plan d'entretien et de suivi spécialement proposé pour les scénarios de gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Le nombre d'échantillons à prélever et à caractériser pour assurer l'entretien et le suivi de chaque scénario/sous-scénarios de même que le coût total des analyses par échantillon sont également montrés au tableau 27.

**Tableau 26: Niveaux d'entretien et de suivi requis par procédé**

| Suivis requis | Dragage mécanique | Dragage hydraulique | Recouvre-ment actif | Réinsertion des sédi-ments | Tarification | Fréquence attendue du suivi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Épaisseur du matériau de recouvrement, suivi de son évolution dans le temps, bioturbation et mélange entre les sédiments et le matériau de recouvrement | | | X | | 43,54 $/h | 1X par saison estivale |
| Retour de la communauté benthique | X | X | X | X | 65,33 $/h | 2X par saison estivale |
| Prise d'échantillons d'eau sur le terrain | X | X | X | X | 43,54 $/h | 4 à 6X par saison estivale |
| Prise d'échantillons de sédiments sur le terrain (incluant résidus de dragage) | X | X | X | | 43,54 $/h | 1X par saison estivale |
| Suivi des concentrations de paramètres d'intérêt dans l'eau de surface | X | X | X | X | 212 $/éch. | 4 à 6X par saison estivale |
| Suivi des concentrations de paramètres d'intérêt dans les sédiments | X | X | X | | 162 $/éch. | 1X par saison estivale |
| Suivi de la bathymétrie du lac | X | X | X | | 65,33 $/h | 1X par saison estivale |
| Relargage des contaminants dans la colonne d'eau | | | | X | 65,33 $/h | 1X pendant la réinsertion |

**Tableau 27: Analyses à effectuer et coûts par type d'échantillons[14]**

| | Échantillon | |
|---|---|---|
| Paramètres analysés | Eau | Sédiments |
| Unité | $ | $ |
| Digestion pour l'analyse des métaux | 0 | 17 |
| Analyse - groupe de 6 métaux (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) | 0 | 58 |
| Analyse des métaux - balayage complet | 92 | 0 |
| Nitrites/nitrates | 39 | 40 |
| Azote ammoniacal | 29 | 0 |
| Phosphore total | 0 | 35 |
| Phosphore soluble | 40 | 0 |
| pH | 12 | 12 |
| Total ($/échantillon analysé) | 212 | 162 |
| Nombre d'échantillons à prélever par zone | 6 | 8 |
| Nombre total d'échantillons à prélever par sortie | 24 | 32 |

[14] Les tarifs utilisés sont ceux de l'Association des Consultants et Laboratoires Experts en 2011 (ACLE, 2011).

Le tableau 28 présente les coûts annuels pour un plan d'entretien et de suivi construit et adapté pour les sous-scénarios proposés au lac Saint-Augustin. Pour chaque élément du plan d'entretien et de suivi du tableau 28, un coût annuel est estimé pour chaque sous-scénario et utilise les informations données dans les tableaux 26 et 27. Les hypothèses réalisées en ce qui concerne la main-d'œuvre utilisée pour l'estimation de chaque montant du tableau 28 sont montrées dans la colonne « main-d'œuvre » pour chaque sous-scénario. À noter qu'une journée de travail correspond à 7,5 heures travaillées.

Les coûts annuels obtenus au tableau 28 sont tous du même ordre de grandeur. Cette observation est normale puisque les mêmes procédés de traitement sont appliqués d'un sous-scénario à l'autre ; seules les superficies sur lesquelles ces procédés sont appliqués changent. Les impacts associés à la réinsertion des sédiments dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin n'ont pas été évalués dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin et aucune donnée n'est disponible en ce qui a trait au relargage qu'une telle pratique peut engendrer. Les sous-scénarios où il y a réinsertion des sédiments dans la fosse centrale coûtent donc un peu plus cher puisqu'un budget additionnel est prévu afin de quantifier le relargage des contaminants à travers le procédé de réinsertion.

À titre comparatif, un montant de 30 000 $ par année a déjà été estimé dans le plan directeur du lac Saint-Augustin réalisé par EXXEP pour le suivi seul de la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin et de ses tributaires (EXXEP, 2003). Cette valeur est cohérente avec les montants calculés au tableau 28 spécifiquement pour les coûts associés au suivi des contaminants d'intérêt dans les eaux de surface. Les paramètres de contamination suivis pour cet estimé ne sont toutefois pas indiqués dans le plan directeur du lac Saint-Augustin.

**Tableau 28 : Données économiques pour les coûts d'entretien et de suivi des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin**

| Scénarios/ Sous-scénarios / Composantes du Plan d'entretien /suivi | Déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) | | | | Traitement des zones prioritaires | | | | Dragage des sédiments des zones I, III et IV + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A1 | | A2 | | B1 | | B2 | | C1 | | C2 | |
| | Main d'œuvre | Coûts ($) | Main d'œuvre | Coûts ($) | Main d'œuvre | Coûts ($) | Main d'œuvre | Coûts ($) | Main d'œuvre | Coûts ($) | Main d'œuvre | Coûts ($) |
| **Épaisseur du matériau de recouvrement, suivi dans le temps, bioturbation et mélange entre sédiments et matériau de recouvrement** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 3 jours | **1 959** | - | **0** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** |
| **Retour de la communauté benthique** | 1 prof. + 1 tech. pour 2X 3 jours. | **4 899** | 1 prof. + 1 tech. Pour 2X 3 jours. | **4 899** | 1 prof. + 1 tech. Pour 2X 3 jours. | **4 899** | 1 prof. + 1 tech. Pour 2X 3 jours. | **4 899** | 1 prof. + 1 tech. Pour 2X 3 jours. | **4 899** | 1 prof. + 1 tech. Pour 2X 3 jours. | **4 899** |
| **Prise d'échantillons d'eau sur le terrain** | 2 tech. pour 6 jours | **3 919** | 2 tech. pour 6 jours | **3 919** | 2 tech. pour 6 jours | **3 919** | 2 tech. pour 6 jours | **3 919** | 2 tech. pour 6 jours | **3 919** | 2 tech. pour 6 jours | **3 919** |
| **Prise d'échantillons de sédiments sur le terrain (incluant résidus de dragage)** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** | 2 tech. pour 1 jour | **653** |
| **Suivi des concentrations de paramètres d'intérêt dans l'eau de surface** | 24 éch. 6 fois/été | **30 528** | 24 éch. 6 fois/été | **30 528** | 24 éch. 6 fois/été | **30 528** | 24 éch. 6 fois/été | **30 528** | 24 éch. 6 fois/été | **30 528** | 24 éch. 6 fois/été | **30 528** |
| **Suivi des concentrations de paramètres d'intérêt dans les sédiments** | 32 éch. 1 fois/été | **5 184** | 32 éch. 1 fois/été | **5 184** | 32 éch. 1 fois/été | **5 184** | 32 éch. 1 fois/été | **5 184** | 32 éch. 1 fois/été | **5 184** | 32 éch. 1 fois/été | **5 184** |
| **Suivi de la bathymétrie du lac** | 2 tech. pour 1 semaine | **3 266** | 2 tech. pour 1 semaine | **3 266** | 2 tech. pour 1 semaine | **3 266** | 2 tech. pour 1 semaine | **3 266** | 2 tech. pour 1 semaine | **3 266** | 2 tech. pour 1 semaine | **3 266** |
| **Relargage des contaminants dans la colonne d'eau lors de la réinsertion des sédiments** | Budget estimé | **5 000** | Budget estimé | **5 000** | - | **0** | - | **0** | - | **0** | - | **0** |
| **TOTAL ($/an)** | **54 101** | | **54 101** | | **50 408** | | **48 448** | | **49 101** | | **49 101** | |

Afin de mettre en évidence la robustesse des montants présentés au tableau 28 pour l'entretien et le suivi des scénarios proposés au lac Saint-Augustin, une comparaison peut être effectuée avec un autre projet réalisé au district de Los Angeles. En effet, le district de Los Angeles a déjà réalisé un plan d'entretien et de suivi à la suite du dragage mécanique de 105 000 m³ de sédiments contaminés en milieu marin avec réinsertion dans une fosse prévue à cet effet. Le coût total d'entretien et de suivi pour un programme de 3 ans était de 45 000 $ pour le suivi du matériau de recouvrement et des sédiments et de 15 000 $ pour le suivi de la qualité de l'eau, le tout pour un total de 60 000 $ sur 3 ans, ou 20 000$ par année (USACE, 2005). Or, les montants annuels finaux présentés au tableau 28 pour l'entretien et le suivi des scénarios proposés au lac Saint-Augustin sont plutôt de l'ordre du 50 000$ annuellement. Dans l'autre projet réalisé au district de Los Angeles, l'entretien et le suivi a été réalisé seulement sur la zone de réinsertion des sédiments et non sur les zones draguées, ce qui peut expliquer les différences avec les montants annuels présentés au tableau 28.

La question du financement d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin est épineuse, mais doit toutefois être abordée. À titre d'exemple, la gestion du lac Okanagan (Colombie-Britannique, Canada) est confiée à l'organisme *Okanagan Basin Water Board* qui s'assure de la promotion des intérêts des communautés se partageant la ressource, propose et met en place des initiatives de prévention pour la protection de l'eau. Le financement de cet organisme qui, au Québec, prendrait le nom de conseil de bassin versant, provient des taxes municipales des communautés présentes sur le bassin versant. À propos, les subventions annuelles perçues par cet organisme atteignent les 3 000 000 $ (Godin, 2011 ; Okanagan Basin Water Board, 2010).

## 4.3 La construction du barème d'évaluation

Maintenant que les caractéristiques techniques des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin ont été décrites et que les coûts économiques ont été évalués, la construction d'un barème d'évaluation pour chacun des sous-critères décrits dans le chapitre 3 doit être réalisée et utiliser au maximum les données disponibles.

Pour les sous-critères techniques et environnementaux, le barème d'évaluation est construit et justifié à l'aide des caractéristiques techniques de la section 4.1. Les caractéristiques

techniques décrites pour chaque sous-scénario sont également utilisées afin d'attribuer des rangs de performance sur chacun des sous-critères techniques et environnementaux au respect des justifications du barème d'évaluation. Pour certains sous-critères environnementaux plus spécifiquement, l'attribution de rangs de performance au respect du barème d'évaluation se fonde aussi sur les résultats préliminaires obtenus par la caractérisation des phases issues du dragage. Ces résultats sont d'ailleurs disponibles à l'annexe F (section F.4). C'est notamment le cas pour les sous-critères environnementaux de qualité de l'eau et de l'air ainsi que de récupération des matériaux et/ou des sédiments.

Pour les sous-critères économiques, le barème d'évaluation est construit à partir de l'évaluation des coûts économiques de chaque sous-scénario à la section 4.2. Dans la section 4.2, l'évaluation des coûts a été divisée en fonction des sous-critères économiques définis au chapitre 3. Le barème d'évaluation est donc construit sur la base d'un intervalle de coûts établi pour chacun des sous-critères économiques et l'évaluation des sous-scénarios est réalisée à l'aide des montants de la section 4.2. Pour les sous-critères sociaux, les justifications du barème d'évaluation sont données à partir des résultats préliminaires obtenus par la distribution du sondage de consultation de l'annexe E. Un sommaire des résultats préliminaires de ce sondage par sous-critère social a été donné à la section 3.3.3.

L'ensemble des sous-critères économiques, techniques, environnementaux et sociaux repris dans le barème d'évaluation ont déjà été définis en détails dans la section 3.3 du chapitre 3. Dans la section 3.3, chaque sous-critère a aussi été commenté en fonction des procédés retenus pour la construction des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. En complément avec les caractéristiques présentées pour chacun des sous-scénarios dans les sections 4.1 et 4.2 et les résultats préliminaires des annexes E et F, les commentaires donnés pour chaque sous-critère dans la section 3.3 ont également été utilisés pour l'évaluation des sous-scénarios sur l'ensemble des sous-critères.

Le barème qui permet l'évaluation des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin à l'égard des sous-critères définis au chapitre 3 est enfin présenté au tableau 29. Les résultats issus de l'évaluation de chaque sous-scénario à l'égard de ce barème y sont également présentés. Le classement représente l'importance relative des sous-critères et a déjà été défini et justifié au tableau 17 par critère.

**Tableau 29: Grille d'évaluation des sous-scénarios pour les sous-critères économiques, techniques, environnementaux et sociaux**

| Critère | Sous-critères | Classement | Rang | Justification | Scénarios[15] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | A | | B | | C | | D |
| | | | | | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | |
| ÉCONOMIQUE | **Investissement initial du projet** | 1 | 1 | Coûts < 3 500 000 $ | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| | | | 2 | 3 500 000 $ < Coûts < 4 500 000 $ | | | | | | | |
| | | | 3 | 4 500 000 $ < Coûts < 5 500 000 $ | | | | | | | |
| | | | 4 | Coûts > 5 500 000 $ | | | | | | | |
| | **Coûts d'entretien et de suivi** | 3 | 1 | Coûts < 45 000 $/an | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| | | | 2 | 45 000 $/an < Coûts < 50 000 $/an | | | | | | | |
| | | | 3 | 50 000 $/an < Coûts < 55 000 $/an | | | | | | | |
| | | | 4 | Coûts très élevés – non quantifiables | | | | | | | |
| | **Disponibilité des matériaux et des équipements** | 4 | 1 | Tous disponibles dans la ville de Québec | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| | | | 2 | Disponibles dans la ville de Québec ET la province de Québec | | | | | | | |
| | | | 3 | Disponibles dans la province de Québec OU à l'extérieur du territoire de la ville de Québec | | | | | | | |
| | **Disposition/valorisation des résidus (sédiments)** | 2 | 1 | Coûts < 500 000 $ | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 |
| | | | 2 | 500 000 $ < Coûts < 1 000 000 $ | | | | | | | |
| | | | 3 | 1 000 000 $ < Coûts < 1 500 000 $ | | | | | | | |
| | | | 4 | Coûts > 1 500 000 $ | | | | | | | |

[15] Scénario A : Dragage des sédiments des zones I, III et IV et déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale (dragage mécanique (A1) et hydraulique (A2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario B : Traitement des zones prioritaires (Recouvrement actif (B1) et dragage hydraulique à succion (B2).
Scénario C : Dragage des sédiments des zones I, III et IV (dragage hydraulique (C1) et mécanique (C2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario D : Statu quo – ne rien faire.

| Critère | Sous-critères | Classement | Rang | Justification | Scénarios[16] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | A | | B | | C | | D |
| | | | | | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | |
| TECHNIQUE | **Durabilité de la solution** | 1 | 1<br>2<br>3 | Solution très durable (> 100 ans)<br>Solution durable (entre 50 et 100 ans)<br>Solution instable (< 50 ans) | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| | **Performance de la solution — enlèvement des contaminants** | 1 | 1<br>2<br>3<br>4 | Enlèvement > 85 %<br>85 % > Enlèvement > 50 %<br>50 % > Enlèvement > 15 %<br>Enlèvement < 15 % | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 |
| | **Turbidité de l'eau et potentiel de relargage** | 2 | 1<br>2<br>3 | Augmentation de la turbidité et aucun relargage<br>Augmentation de la turbidité et du potentiel de relargage<br>Turbidité très élevée ET/OU relargage très important | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| | **Faisabilité de la solution** | 3 | 1<br>2<br>3<br>4 | Solution facilement applicable au lac Saint-Augustin<br>Solution applicable au lac Saint-Augustin<br>Solution difficilement applicable au lac Saint-Augustin<br>Solution très difficilement applicable au lac Saint-Augustin | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| | **Flexibilité de la solution** | 4 | 1<br>2<br>3<br>4 | Mesures d'atténuation non requises<br>Mesures d'atténuation souhaitées, mais non obligatoires<br>Mesures d'atténuation souhaitées et obligatoires<br>Mesures à prendre dans l'immédiat | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 |

[16] Scénario A : Dragage des sédiments des zones I, III et IV et déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale (dragage mécanique (A1) et hydraulique (A2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario B : Traitement des zones prioritaires (Recouvrement actif (B1) et dragage hydraulique à succion (B2).
Scénario C : Dragage des sédiments des zones I, III et IV (dragage hydraulique (C1) et mécanique (C2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario D : Statu quo – ne rien faire.

| Critère | Sous-critères | Classement | Rang | Justification | Scénarios[17] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | A | | B | | C | | D |
| | | | | | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | |
| ENVIRONNEMENTAL | **Récupération des matériaux *(utilisés pour l'implantation de la solution)* et/ou des sédiments *(à l'intérieur du bassin versant)*** | 3 | 1 | Confinement des sédiments *(études toxicologiques potentiellement requises)* à l'intérieur du bassin versant | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | | | 2 | Valorisation des sédiments à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant | | | | | | | |
| | | | 3 | Aucune récupération de matériaux et/ou des sédiments | | | | | | | |
| | **Gestion écoresponsable des contaminants** | 2 | 1 | Respecte les 3 principes du développement durable | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | | | 2 | Respecte certains principes du développement durable | | | | | | | |
| | | | 3 | Ne respecte pas le développement durable | | | | | | | |
| | **Qualité de l'eau et de l'air *(nombre de voyages de camion requis et variation dans la qualité de l'eau immédiatement après l'implantation de la solution)*** | 2 | 1 | Faible diminution de la qualité de l'eau/nombre de voyages de camions faible | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| | | | 2 | Faible diminution de la qualité de l'eau/nombre de voyages de camions élevé | | | | | | | |
| | | | 3 | Diminution importante de la qualité de l'eau/nombre de voyages de camions faible | | | | | | | |
| | | | 4 | Diminution importante de la qualité de l'eau/nombre de voyages de camions élevé | | | | | | | |
| | **Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution** | 1 | 1 | Aucune perturbation dans l'écosystème | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| | | | 2 | Perturbation temporaire de l'écosystème (non définitif) | | | | | | | |
| | | | 3 | Perturbation importante de l'écosystème avec possibilité de rétablissement | | | | | | | |
| | | | 4 | Destruction totale de l'écosystème « sain » | | | | | | | |

[17] Scénario A : Dragage des sédiments des zones I, III et IV et déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale (dragage mécanique (A1) et hydraulique (A2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario B : Traitement des zones prioritaires (Recouvrement actif (B1) et dragage hydraulique à succion (B2).
Scénario C : Dragage des sédiments des zones I, III et IV (dragage hydraulique (C1) et mécanique (C2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario D : Statu quo – ne rien faire.

| Critère | Sous-critères | Classement | Rang | Justification | Scénarios[18] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | A | | B | | C | | D |
| | | | | | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | |
| SOCIAL | **Nuisances subies** ***(bruit, odeurs, poussière, durée des opérations, activités récréatives, …)*** | 3 | 1<br>2<br>3<br>4 | Suspension des usages ET/OU longue durée des travaux<br>Augmentation de la circulation par camions (livraisons)<br>Augmentation du niveau sonore et/ou de la poussière<br>Présence de mauvaises odeurs | 4 | 4 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1 |
| | **Acceptation du projet par le public** | 1 | 1<br>2<br>3 | Public très favorable au projet — peu ou pas d'objections<br>Public relativement ouvert au projet — objections ponctuelles<br>Public très réticent au projet — objections généralisées | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| | **Accessibilité financière du projet par les contribuables** ***(et respect du prêt-à-payer)*** | 2 | 1<br>2<br>3 | Très abordable vu la performance offerte<br>Pas trop cher vu la performance offerte<br>Trop cher pour la performance offerte | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| | **Gain social et restauration des usages du lac** | 1 | 1<br>2<br>3<br>4 | Récupération de tous les usages (baignade, pêche,…)<br>Récupération probable de tous les usages (baignade, …)<br>Récupération des usages de contact indirect (canot, …)<br>Aucune récupération des usages | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 |
| | **Intégration à la communauté de façon structurante** ***(harmonisation des opérations aux initiatives locales)*** | 4 | 1<br>2<br>3 | Très intégré aux initiatives locales<br>Peu intégré aux initiatives locales<br>Pas du tout intégré aux initiatives locales | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |

[18] Scénario A : Dragage des sédiments des zones I, III et IV et déplacement des sédiments contaminé vers la fosse centrale (dragage mécanique (A1) et hydraulique (A2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario B : Traitement des zones prioritaires (Recouvrement actif (B1) et dragage hydraulique à succion (B2).
Scénario C : Dragage des sédiments des zones I, III et IV (dragage hydraulique (C1) et mécanique (C2)) + recouvrement actif (alun - calcaire/sable) de la fosse centrale.
Scénario D : Statu quo – ne rien faire.

## 4.4 La méthode hiérarchique multicritères de Thomas Saaty

Les sous-sections qui suivent présentent les scores obtenus selon la méthode hiérarchique multicritères programmée dans Excel pour chaque sous-scénario de gestion des sédiments contaminés envisagés au lac Saint-Augustin. Chaque sous-section représente une des situations de l'analyse de sensibilité définies au tableau 16. En tout temps, le lecteur est invité à se référer à l'annexe H qui montre les matrices de comparaison utilisées pour déterminer les poids des critères pour chacune des situations de l'analyse de sensibilité, les matrices de comparaison des sous-critères de même que les matrices de comparaison des performances des sous-scénarios à l'égard de chaque sous-critère. Aussi, l'annexe I utilise les poids des composantes de chacun des niveaux de la hiérarchie calculés à l'annexe H et présente les tableaux récapitulatifs qui permettent le calcul du vecteur de priorité global pour chacun des sous-scénarios et pour chacune des situations de l'analyse de sensibilité. Un exemple de calcul y est d'ailleurs donné.

### 4.4.1 Situation I : L'égalité des poids des critères

Dans cette situation, tous les critères de la décision se voient attribuer un même poids et comme il y a quatre critères, chacun pèse pour 25 % dans la décision finale. La figure 32 montre les scores de performance obtenus pour chaque sous-scénario selon chaque critère pour la situation I de l'analyse de sensibilité. Les poids de chaque critère dans la décision sont mis en évidence par un histogramme et les scores de performance des sous-scénarios par critère sont représentés par les lignes d'un critère à l'autre. Le tableau 30 montre les valeurs numériques des scores de performance obtenus par les différents sous-scénarios pour chaque critère. Le total représente le vecteur de priorité globale dans lequel les scores de performance de chaque sous-scénario sont indiqués. Le sous-scénario le plus performant est celui qui maximise cette valeur. Le lecteur est invité à consulter l'annexe I pour le tableau I-1 détaillé des calculs.

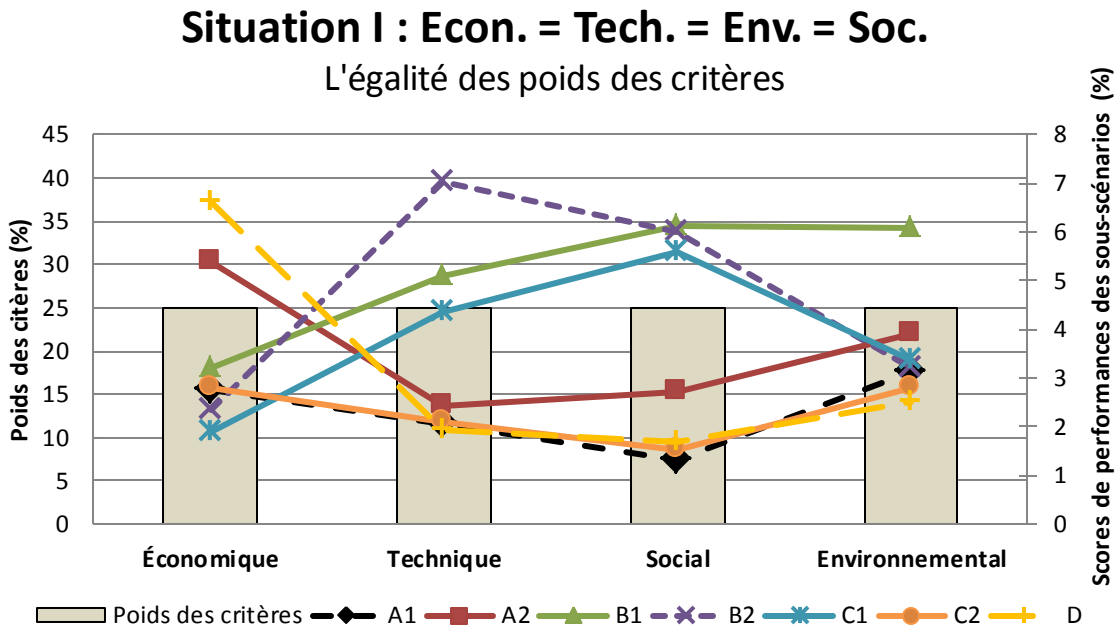


**Figure 32: Résultats de la situation I — Méthode hiérarchique multicritères**

**Tableau 30: Situation I – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario**

| Sous-scénarios | Scores de performance obtenus par critère | | | | Total (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Économique (%) | Technique (%) | Social (%) | Environnemental (%) | |
| **A1** | 2.76 | 2.07 | 1.33 | 3.12 | 9.28 |
| **A2** | 5.39 | 2.42 | 2.73 | 3.90 | 14.45 |
| **B1** | 3.21 | 5.10 | 6.14 | 6.08 | 20.53 |
| **B2** | 2.34 | 7.02 | 6.01 | 3.21 | 18.57 |
| **C1** | 1.90 | 4.35 | 5.59 | 3.38 | 15.22 |
| **C2** | 2.78 | 2.10 | 1.51 | 2.82 | 9.21 |
| **D** | 6.62 | 1.94 | 1.70 | 2.49 | 12.75 |

### 4.4.2 Situation II : L'approche traditionnelle

Dans cette situation, les critères économique (42 %) et technique (42 %) sont plus importants que les critères environnemental (8 %) et social (8 %). Les poids de chacun des critères sont indiqués entre parenthèses et la matrice de comparaison utilisée pour le calcul des poids peut être consultée à l'annexe H. La figure 33 montre les scores de performance obtenus pour chaque sous-scénario selon chaque critère pour la situation II de l'analyse de

sensibilité. De la même manière, le tableau 31 montre les valeurs numériques des scores de performance obtenus par les différents sous-scénarios pour chacun des critères. Le lecteur est invité à consulter l'annexe I pour le tableau I-2 détaillé des calculs.

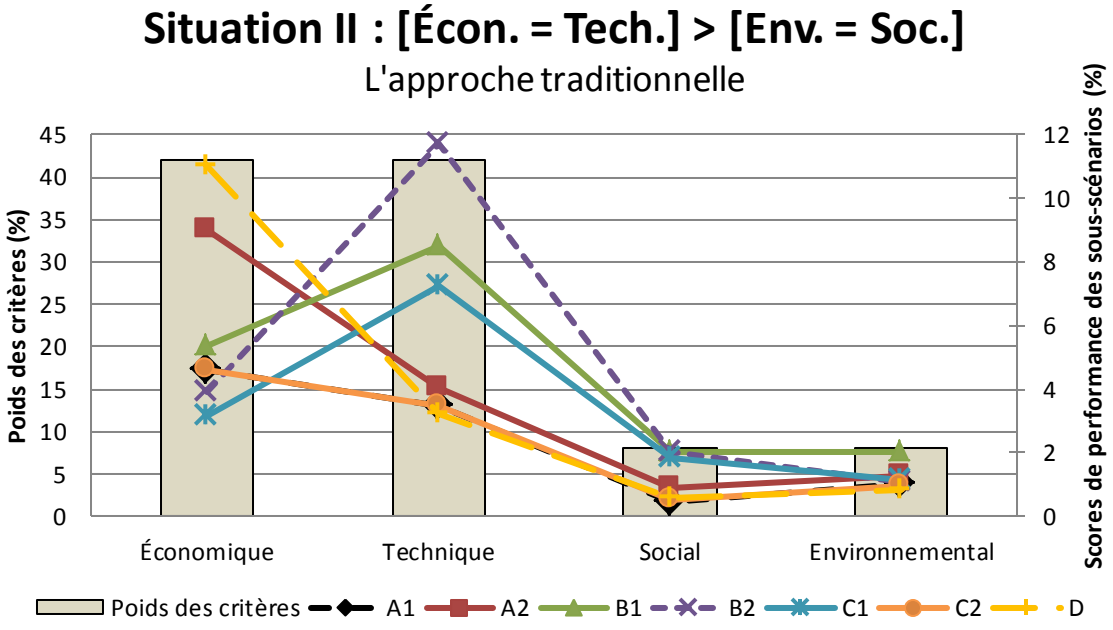


**Figure 33: Résultats de la situation II — Méthode hiérarchique multicritères**

**Tableau 31: Situation II – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario**

| Sous-scénarios | Scores de performance obtenus par critère | | | | Total (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Économique (%) | Technique (%) | Social (%) | Environnemental (%) | |
| **A1** | 4.60 | 3.45 | 0.44 | 1.04 | 9.53 |
| **A2** | 8.99 | 4.04 | 0.91 | 1.30 | 15.23 |
| **B1** | 5.34 | 8.51 | 2.05 | 2.03 | 17.92 |
| **B2** | 3.90 | 11.69 | 2.00 | 1.07 | 18.67 |
| **C1** | 3.17 | 7.25 | 1.86 | 1.13 | 13.41 |
| **C2** | 4.63 | 3.50 | 0.50 | 0.94 | 9.58 |
| **D** | 11.03 | 3.24 | 0.57 | 0.83 | 15.66 |

### 4.4.3 Situation III : L'approche progressiste-écologique

Dans la situation III, les critères environnemental (42 %) et social (42 %) sont cette fois plus importants que les critères économique (8 %) et technique (8 %). Les poids des

critères sont indiqués entre parenthèses et la matrice de comparaison utilisée pour le calcul des poids peut être consultée à l'annexe H. La figure 34 montre graphiquement les scores de performance obtenus pour chaque sous-scénario selon chaque critère pour la situation III de l'analyse de sensibilité. Le tableau 32 montre les valeurs numériques des scores de performance obtenus par les différents sous-scénarios pour chaque critère. Le lecteur est invité à consulter l'annexe I pour le tableau I-3 détaillé des calculs.

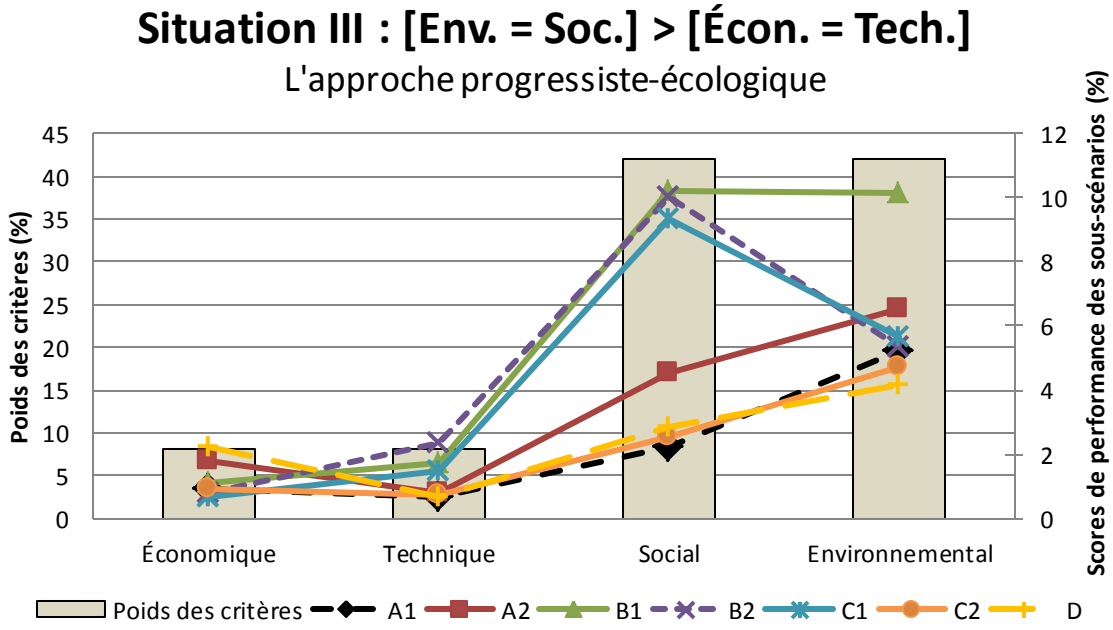


**Figure 34: Résultats de la situation III - Méthode hiérarchique multicritères**

**Tableau 32: Situation III – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario**

| Sous-scénarios | Scores de performance obtenus par critère | | | | Total (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Économique (%) | Technique (%) | Social (%) | Environnemental (%) | |
| **A1** | 0.92 | 0.69 | 2.22 | 5.21 | 9.03 |
| **A2** | 1.80 | 0.81 | 4.55 | 6.51 | 13.66 |
| **B1** | 1.07 | 1.70 | 10.23 | 10.13 | 23.13 |
| **B2** | 0.78 | 2.34 | 10.01 | 5.34 | 18.47 |
| **C1** | 0.63 | 1.45 | 9.31 | 5.63 | 17.03 |
| **C2** | 0.93 | 0.70 | 2.52 | 4.69 | 8.84 |
| **D** | 2.21 | 0.65 | 2.83 | 4.16 | 9.84 |

### 4.4.4 Situation IV : Le gain de capital politique

Dans cette dernière situation, les critères technique (39 %) et social (39 %) sont plus importants que le critère économique (13 %) et ceux-ci sont tous plus importants que le critère technique (8 %). Les poids de chacun des critères sont indiqués entre parenthèses et la matrice de comparaison utilisée pour le calcul des poids peut être consultée à l'annexe H. La figure 35 montre les scores de performance obtenus pour chaque sous-scénario selon chaque critère pour la situation IV de l'analyse de sensibilité. Enfin, le tableau 33 montre les valeurs numériques des scores de performance obtenus par les différents sous-scénarios pour chaque critère. Le lecteur est invité à consulter l'annexe I pour le tableau I-4 détaillé des calculs.

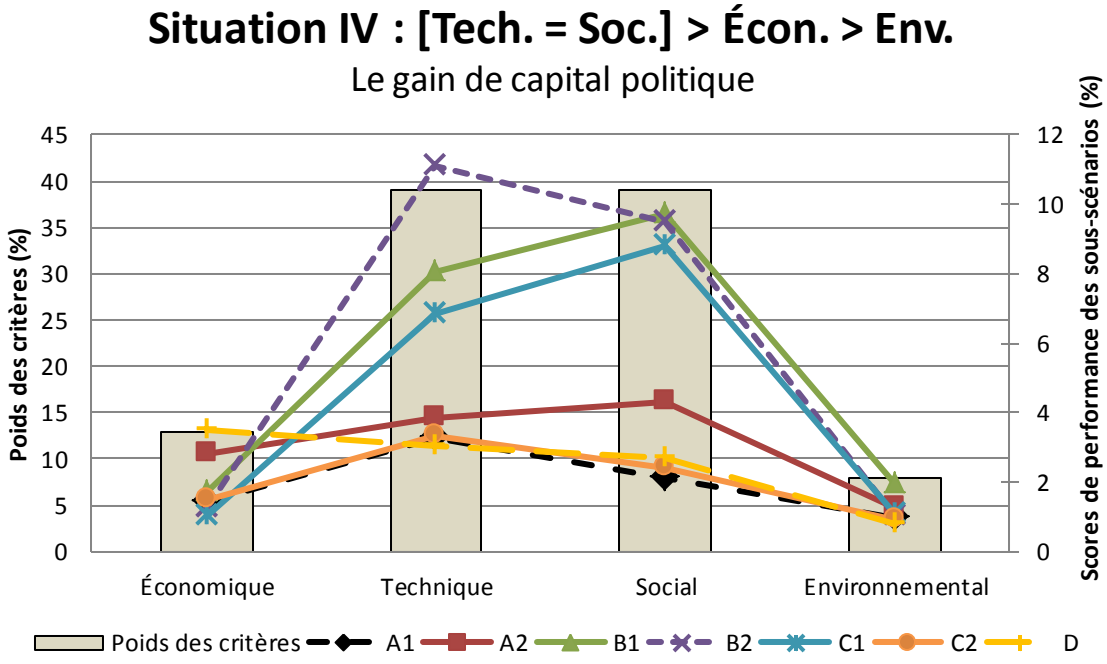


**Figure 35: Résultats de la situation IV — Méthode hiérarchique multicritères**

**Tableau 33: Situation IV – Scores obtenus par critère et score total pour chaque sous-scénario**

| Sous-scénarios | Scores de performance obtenus par critère | | | | Total (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Économique (%) | Technique (%) | Social (%) | Environnemental (%) | |
| **A1** | 1.45 | 3.26 | 2.10 | 0.99 | 7.80 |
| **A2** | 2.84 | 3.82 | 4.31 | 1.23 | 12.21 |
| **B1** | 1.69 | 8.06 | 9.69 | 1.92 | 21.36 |
| **B2** | 1.23 | 11.08 | 9.49 | 1.01 | 22.81 |
| **C1** | 1.00 | 6.87 | 8.82 | 1.07 | 17.76 |
| **C2** | 1.46 | 3.32 | 2.39 | 0.89 | 8.06 |
| **D** | 3.48 | 3.07 | 2.68 | 0.79 | 10.01 |

### 4.4.5 Sommaire de l'analyse de sensibilité selon la méthode hiérarchique multicritères

Les scores de performance totaux obtenus par sous-scénario et pour l'ensemble des situations de l'analyse de sensibilité sont rassemblés au tableau 34. Les scores de performance pour chaque sous-scénario correspondent au vecteur de priorité global des tableaux 30 à 33 pour chaque situation et le meilleur sous-scénario par situation est celui qui possède la valeur maximale.

**Tableau 34: Scores de performance obtenus par sous-scénario pour l'ensemble des situations de l'analyse de sensibilité**

| Sous-scénarios | Situation I — L'égalité des poids des critères (%) | Situation II — Approche traditionnelle (%) | Situation III — Approche progressiste-écologique (%) | Situation IV — Le gain de capital politique (%) |
|---|---|---|---|---|
| **A1** | 9.28 | 9.53 | 9.03 | 7.80 |
| **A2** | 14.45 | 15.23 | 13.66 | 12.21 |
| **B1** | 20.53 | 17.92 | 23.13 | 21.36 |
| **B2** | 18.57 | 18.67 | 18.47 | 22.81 |
| **C1** | 15.22 | 13.41 | 17.03 | 17.76 |
| **C2** | 9.21 | 9.58 | 8.84 | 8.06 |
| **D** | 12.75 | 15.66 | 9.84 | 10.01 |

La figure 36 présente les données du tableau 34 sous la forme de groupes d'histogrammes et permet une comparaison visuelle des scores de performance et de l'ordonnancement des sous-scénarios entre eux d'une situation à l'autre de l'analyse de sensibilité.

On peut voir sur la figure 36 que les deux meilleurs sous-scénarios qui ressortent suite à l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères sont respectivement B1 et B2 pour l'ensemble des situations. Dans les situations I et III, la coagulation à l'alun suivie par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur l'ensemble des zones les plus contaminées du lac (B1) est préféré au dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées (B2). L'inverse est observé dans les situations II et IV, où B2 est cette fois préféré à B1. Néanmoins, les deux premières places sont toujours occupées par B1 ou B2 peu importe la situation de l'analyse de sensibilité.

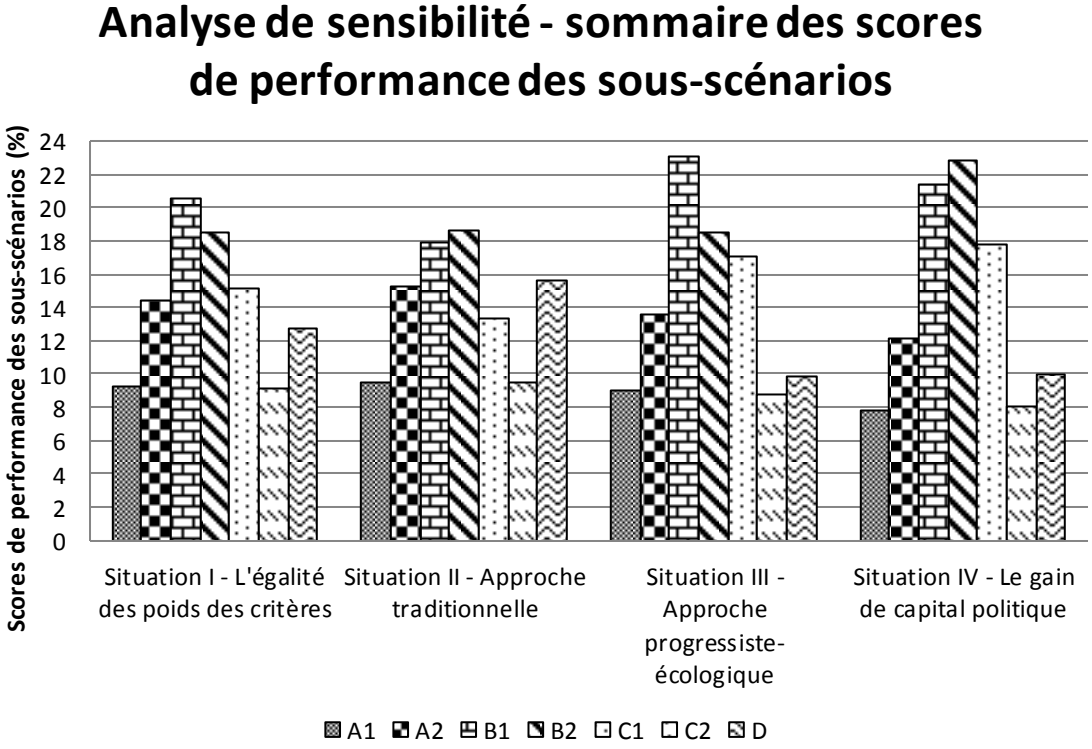


**Figure 36: Histogrammes des performances totales pour chaque situation de l'analyse de sensibilité**

Les sous-scénarios A2 et C1 correspondent respectivement au dragage hydraulique des zones I, III et IV avec (A2) ou sans (C1) la réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac. Dans les deux cas, la fosse centrale est recouverte à l'aide d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable avec ajout préalable d'alun à la colonne d'eau. Sur la figure 36, la troisième position est occupée par C1 pour les situations I, III et IV et par D – le statu quo pour la situation II. En se référant au tableau 31, le score obtenu

par le statu quo par rapport aux autres sous-scénarios est expliquée par son score de performance sur le critère économique dont le poids dans la décision est plus fort pour la situation II. La quatrième position est toujours occupée par A2 peu importe la situation.

La cinquième position est occupée par D – le statu quo pour les situations I, III et IV et par C1 pour la situation II. Les deux dernières positions (6 et 7) sont partagées entre les sous-scénarios A1 et C2 pour l'ensemble des situations. Par ailleurs, les scores de performance obtenus par ces deux sous-scénarios sont très similaires pour chaque situation. Les sous-scénarios A1 et C2 correspondent au dragage mécanique avec (A1) ou sans (C2) réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac suivi du recouvrement actif de la fosse.

Bien que le dragage mécanique soit une solution peu dispendieuse dans le cas où les sédiments dragués sont réinsérés dans la fosse centrale du lac (A1), ce mode de dragage (A1 et C2) satisfait mal les sous-critères techniques et génère des impacts importants sur l'environnement et la qualité de l'eau. De plus, il ne cadre pas avec la vision qu'a le public d'un projet de gestion des sédiments contaminés pour le cas du lac Saint-Augustin et satisfait mal les sous-critères sociaux. Enfin, le statu quo (D) affiche toujours un meilleur score de performance que les sous-scénarios de dragage mécanique (A1 et C2), peu importe la situation de l'analyse de sensibilité.

Les sous-scénarios de dragage hydraulique (A2, B2 et C1) offrent de meilleurs scores de performance que le dragage mécanique (A1 et C2) pour toutes les situations. Bien que le dragage hydraulique de toutes les zones à haute contamination (B2) soit préféré au dragage hydraulique des zones I, III et IV avec (A2) et sans (C1) la réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale, C1 est plus performant que A2 pour les situations I, III et IV, et inversement pour la situation II. Cette observation s'explique par la bonne performance de A2 sur le critère économique dont le poids est plus important dans la situation II. Enfin, la performance de C1 sur les critères technique et social est nettement plus élevée que A2, d'où la performance de C1 pour les situations I, III et IV.

## 4.5 La méthode ordinale de Holmes

La méthode ordinale de Holmes alloue une importance égale à chaque critère de la décision tout en permettant l'attribution d'importances relatives au niveau des sous-critères dès le départ. Pour chaque sous-critère, un rang pondéré est trouvé à partir de l'importance du sous-critère et du rang de chaque sous-scénario à l'égard de ce sous-critère au respect du barème d'évaluation. Un cumul des positions permet ensuite d'identifier la meilleure solution au global et pour chaque critère. Le tableau 35 illustre les rangs pondérés obtenus à l'aide de la méthode ordinale de Holmes pour chaque sous-scénario et pour chacun des critères de la décision. Un classement des positions des sous-scénarios par critère est également donné au tableau 35 et permet d'identifier les meilleurs sous-scénarios pour chacun des critères.

**Tableau 35: Résultats de la méthode ordinale de Holmes par critère (économique, technique, environnemental et social)**

| Critère | Sous-critère | Classe-ment | Sous-scénarios | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A1 | | A2 | | B1 | | B2 | | C1 | | C2 | | D | |
| | | | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré |
| **Économique** | **Investissement initial du projet (incluant mesures d'atténuation)** | **1** | 2 | **2** | 1 | **1** | 3 | **3** | 2 | **2** | 3 | **3** | 2 | **2** | 1 | **1** |
| | **Coûts d'entretien et de suivi** | **3** | 3 | **5** | 3 | **5** | 3 | **5** | 2 | **4** | 2 | **4** | 2 | **4** | 4 | **6** |
| | **Disponibilité des matériaux et des équipements** | **4** | 1 | **4** | 2 | **5** | 1 | **4** | 3 | **6** | 2 | **5** | 1 | **4** | 1 | **4** |
| | **Disposition / valorisation des résidus (sédiments)** | **2** | 2 | **3** | 2 | **3** | 1 | **2** | 4 | **5** | 3 | **4** | 3 | **4** | 1 | **2** |
| **Cumul - rang pondéré - 1ere position** | | | 0 | | 1 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 1 | |
| **Cumul - rang pondéré - 2e position** | | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | |
| **Cumul - rang pondéré - 3e position** | | | 1 | | 1 | | 1 | | 0 | | 1 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 4e position** | | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | | 2 | | 3 | | 1 | |
| **Cumul - rang pondéré - 5e position** | | | 1 | | 2 | | 1 | | 1 | | 1 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 6e position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 1 | | 0 | | 0 | | 1 | |
| **Cumul - rang pondéré - 7e position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **CLASSEMENT** | | | **3** | | **2** | | **3** | | **5** | | **6** | | **4** | | **1** | |

| Critère | Sous-critère | Classe-ment | Sous-scénarios | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A1 | | A2 | | B1 | | B2 | | C1 | | C2 | | D | |
| | | | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré |
| Technique | Durabilité de la solution | 1 | 2 | **2** | 2 | **2** | 3 | **3** | 1 | **1** | 2 | **2** | 2 | **2** | 3 | **3** |
| | Performance de la solution - enlèvement des contaminants | 1 | 3 | **3** | 2 | **2** | 1 | **1** | 1 | **1** | 1 | **1** | 3 | **3** | 4 | **4** |
| | Turbidité de l'eau et potentiel de relargage | 2 | 3 | **4** | 3 | **4** | 1 | **2** | 2 | **3** | 2 | **3** | 3 | **4** | 3 | **4** |
| | Faisabilité de la solution | 3 | 4 | **6** | 3 | **5** | 2 | **4** | 1 | **3** | 2 | **4** | 3 | **5** | 1 | **3** |
| | Flexibilité de la solution | 4 | 3 | **6** | 3 | **6** | 1 | **4** | 2 | **5** | 2 | **5** | 3 | **6** | 4 | **7** |
| **Cumul - rang pondéré - 1ere position** | | | 0 | | 0 | | 1 | | 2 | | 1 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 2e position** | | | 1 | | 2 | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 3e position** | | | 1 | | 0 | | 1 | | 2 | | 1 | | 1 | | 2 | |
| **Cumul - rang pondéré - 4e position** | | | 1 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 1 | | 2 | |
| **Cumul - rang pondéré - 5e position** | | | 0 | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | | 1 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 6e position** | | | 2 | | 1 | | 0 | | 0 | | 0 | | 1 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 7e position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 1 | |
| **CLASSEMENT** | | | **6** | | **4** | | **2** | | **1** | | **3** | | **5** | | **7** | |

| Critère | Sous-critère | Classe-ment | Sous-scénarios | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A1 | | A2 | | B1 | | B2 | | C1 | | C2 | | D | |
| | | | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré |
| Environnemental | Récupération des matériaux *(utilisés pour l'implantation de la solution)* et/ou des sédiments *(à l'intérieur du bassin versant)* | 3 | 1 | **3** | 1 | **3** | 3 | **5** | 2 | **4** | 2 | **4** | 2 | **4** | 3 | **5** |
| | Gestion éco-responsable des contaminants | 2 | 3 | **4** | 2 | **3** | 1 | **2** | 2 | **3** | 2 | **3** | 2 | **3** | 3 | **4** |
| | Qualité de l'eau et de l'air *(nombre de voyages de camion requis et variation dans la qualité de l'eau immédiatement après l'implantation de la solution)* | 2 | 3 | **4** | 3 | **4** | 2 | **3** | 4 | **5** | 3 | **4** | 3 | **4** | 3 | **4** |
| | Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution | 1 | 4 | **4** | 3 | **3** | 2 | **2** | 3 | **3** | 3 | **3** | 4 | **4** | 4 | **4** |
| **Cumul - rang pondéré - 1ere position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 2e position** | | | 0 | | 0 | | 2 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 3e position** | | | 1 | | 3 | | 1 | | 2 | | 2 | | 1 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 4e position** | | | 3 | | 1 | | 0 | | 1 | | 2 | | 3 | | 3 | |
| **Cumul - rang pondéré - 5e position** | | | 0 | | 0 | | 1 | | 1 | | 0 | | 0 | | 1 | |
| **Cumul - rang pondéré - 6e position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 7e position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **CLASSEMENT** | | | **5** | | **2** | | **1** | | **4** | | **3** | | **5** | | **6** | |

| Critère | Sous-critère | Classe-ment | Sous-scénarios | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A1 | | A2 | | B1 | | B2 | | C1 | | C2 | | D | |
| | | | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré | Rang | Rang pondéré |
| Social | Nuisances subies (travailleurs/riverains) *(bruit, odeurs, poussière, durée des opérations, activités récréatives, …)* | 3 | 4 | **6** | 4 | **6** | 3 | **5** | 1 | **3** | 2 | **4** | 4 | **6** | 1 | **3** |
| | Acceptation du public | 1 | 3 | **3** | 2 | **2** | 1 | **1** | 1 | **1** | 1 | **1** | 3 | **3** | 3 | **3** |
| | Accessibilité financière du projet *(et respect du prêt-à-payer)* | 2 | 3 | **4** | 1 | **2** | 1 | **2** | 2 | **3** | 2 | **3** | 3 | **4** | 3 | **4** |
| | Gain social et restauration des usages du lac | 1 | 3 | **3** | 2 | **2** | 1 | **1** | 1 | **1** | 1 | **1** | 3 | **3** | 4 | **4** |
| | Intégration à la communauté de façon structurante *(harmonisation des opérations avec les initiatives locales)* | 4 | 2 | **5** | 2 | **5** | 1 | **4** | 1 | **4** | 1 | **4** | 1 | **4** | 3 | **6** |
| **Cumul - rang pondéré - 1ere position** | | | 0 | | 0 | | 2 | | 2 | | 2 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 2e position** | | | 0 | | 3 | | 1 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 3e position** | | | 2 | | 0 | | 0 | | 2 | | 1 | | 2 | | 2 | |
| **Cumul - rang pondéré - 4e position** | | | 1 | | 0 | | 1 | | 1 | | 2 | | 2 | | 2 | |
| **Cumul - rang pondéré - 5e position** | | | 1 | | 1 | | 1 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **Cumul - rang pondéré - 6e position** | | | 1 | | 1 | | 0 | | 0 | | 0 | | 1 | | 1 | |
| **Cumul - rang pondéré - 7e position** | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **CLASSEMENT** | | | **6** | | **4** | | **1** | | **2** | | **3** | | **5** | | **5** | |

Enfin, le tableau 36 montre le classement final des sous-scénarios proposés au lac Saint-Augustin selon la méthode ordinale de Holmes en considérant l'ensemble des critères à la fois dans une même analyse.

**Tableau 36: Classification finale des sous-scénarios selon la méthode ordinale de Holmes**

| Positions | Sous-scénarios | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D |
| Cumul - rang pondéré - 1ere position | 0 | 1 | 3 | 4 | 3 | 0 | 1 |
| Cumul - rang pondéré - 2e position | 2 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Cumul - rang pondéré - 3e position | 5 | 4 | 3 | 6 | 5 | 4 | 4 |
| Cumul - rang pondéré - 4e position | 6 | 2 | 4 | 3 | 7 | 9 | 8 |
| Cumul - rang pondéré - 5e position | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Cumul - rang pondéré - 6e position | 3 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 |
| Cumul - rang pondéré - 7e position | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **CLASSEMENT** | **6** | **4** | **2** | **1** | **3** | **7** | **5** |

La première et la deuxième position reviennent respectivement au dragage hydraulique (B2) et au recouvrement actif (B1) de l'ensemble des zones à haute contamination du lac Saint-Augustin. Le dragage hydraulique des zones I, III et IV (A2 et C1) sans réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac (C1) est préféré au cas où il y a réinsertion (A2) dans la fosse. Le statu quo (D) occupe la cinquième position, devant les sous-scénarios où il y a dragage mécanique des sédiments contaminés (A1 et C2).

## 4.6 Comparaison des deux méthodes multicritères d'aide à la décision

Une comparaison peut se faire entre les résultats obtenus par la méthode ordinale de Holmes et la situation I de la méthode hiérarchique multicritères puisque les importances relatives attribuées aux critères et aux sous-critères sont invariables d'une méthode à l'autre. Le tableau 37 montre un sommaire du classement global obtenu en considérant l'ensemble des critères à la fois pour chaque sous-scénario selon les 4 situations de la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes.

**Tableau 37: Sommaire du classement global des sous-scénarios pour chaque méthode**

| Position | 1er | 2e | 3e | 4e | 5e | 6e | 7e |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Holmes** | B2 | B1 | C1 | A2 | D | A1 | C2 |
| **Situation I – L'égalité des poids des critères** | B1 | B2 | C1 | A2 | D | A1 | C2 |
| **Situation II - L'approche traditionnelle** | B2 | B1 | D | A2 | C1 | C2 | A1 |
| **Situation III – L'approche progressiste-écologique** | B1 | B2 | C1 | A2 | D | A1 | C2 |
| **Situation IV - Le gain de capital politique** | B2 | B1 | C1 | A2 | D | C2 | A1 |

Le classement global des sous-scénarios est le même entre la méthode ordinale de Holmes et la situation I de la méthode hiérarchique multicritères, à l'exception d'une permutation entre la 1er et la 2e position. Les résultats obtenus à l'aide des deux méthodes multicritères d'aide à la décision et pour toutes les situations de l'analyse de sensibilité font ressortir deux sous-scénarios très performants qui pourraient très bien faire l'objet d'une recommandation à l'échelle du lac. Il s'agit des sous-scénarios de coagulation à l'alun suivie du confinement des contaminants par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur l'ensemble des zones les plus contaminées du lac (B1) et du dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant (B2).

Il convient maintenant de pousser plus loin l'analyse des résultats obtenus en considérant de manière individuelle chacun des critères définis dans le processus décisionnel. Le tableau 38 présente le positionnement de chaque sous-scénario à la lumière des scores de performance obtenus selon la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes pour chacun des critères. Les tableaux de référence utilisés pour construire le tableau 38 sont les tableaux 30 à 33 pour la méthode hiérarchique multicritères et le tableau 35 pour la méthode ordinale de Holmes.

On remarque que l'ordre des positions occupées par les sous-scénarios proposés au lac Saint-Augustin ne change pas entre les deux méthodes multicritères pour chacun des critères. Un décalage peut néanmoins survenir si deux sous-scénarios occupent la même position pour un critère selon la méthode ordinale de Holmes, comme c'est le cas pour les critères économique, environnemental et social.

**Tableau 38: Sommaire des positions des sous-scénarios par critère pour chaque méthode**

| Position | 1er | 2e | 3e | 4e | 5e | 6e | 7e |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CRITÈRE ÉCONOMIQUE** | | | | | | | |
| **Holmes** | D | A2 | A1/B1 | C2 | B2 | C1 | - |
| **Situation I – L'égalité des poids des critères** | D | A2 | B1 | C2 | A1 | B2 | C1 |
| **Situation II - L'approche traditionnelle** | D | A2 | B1 | C2 | A1 | B2 | C1 |
| **Situation III - L'approche progressiste-écologique** | D | A2 | B1 | C2 | A1 | B2 | C1 |
| **Situation IV - Le gain de capital politique** | D | A2 | B1 | C2 | A1 | B2 | C1 |
| **CRITÈRE TECHNIQUE** | | | | | | | |
| **Holmes** | B2 | B1 | C1 | A2 | C2 | A1 | D |
| **Situation I – L'égalité des poids des critères** | B2 | B1 | C1 | A2 | C2 | A1 | D |
| **Situation II - L'approche traditionnelle** | B2 | B1 | C1 | A2 | C2 | A1 | D |
| **Situation III - L'approche progressiste-écologique** | B2 | B1 | C1 | A2 | C2 | A1 | D |
| **Situation IV - Le gain de capital politique** | B2 | B1 | C1 | A2 | C2 | A1 | D |
| **CRITÈRE ENVIRONNEMENTAL** | | | | | | | |
| **Holmes** | B1 | A2 | C1 | B2 | A1/C2 | D | - |
| **Situation I – L'égalité des poids des critères** | B1 | A2 | C1 | B2 | A1 | C2 | D |
| **Situation II - L'approche traditionnelle** | B1 | A2 | C1 | B2 | A1 | C2 | D |
| **Situation III - L'approche progressiste-écologique** | B1 | A2 | C1 | B2 | A1 | C2 | D |
| **Situation IV - Le gain de capital politique** | B1 | A2 | C1 | B2 | A1 | C2 | D |
| **CRITÈRE SOCIAL** | | | | | | | |
| **Holmes** | B1 | B2 | C1 | A2 | C2/D | A1 | - |
| **Situation I – L'égalité des poids des critères** | B1 | B2 | C1 | A2 | D | C2 | A1 |
| **Situation II - L'approche traditionnelle** | B1 | B2 | C1 | A2 | D | C2 | A1 |
| **Situation III - L'approche progressiste-écologique** | B1 | B2 | C1 | A2 | D | C2 | A1 |
| **Situation IV - Le gain de capital politique** | B1 | B2 | C1 | A2 | D | C2 | A1 |

Pour tous les critères à l'exception du critère technique, on remarque que le sous-scénario de coagulation à l'alun suivie par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur l'ensemble des zones les plus contaminées du lac (B1) occupe une meilleure position que le sous-scénario de dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant (B2). En référence au tableau 37, B1 est préférable à B2 pour les situations I et III, et inversement pour les situations II et IV de la méthode hiérarchique multicritères. Dans les situations II et IV, le poids du critère technique est plus élevé que pour les situations I et III. En d'autres mots, le poids alloué au critère technique influence la position globale des deux sous-scénarios les plus performants (B1 et B2) selon la méthode hiérarchique multicritères.

D'un point de vue technique, les deux meilleurs sous-scénarios sont respectivement B2 et B1. Ceux-ci sont suivis de près par les sous-scénarios de dragage hydraulique des zones I, III et IV avec (A2) et sans (C1) la réinsertion et le confinement des sédiments dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin. En plus du statu quo (D), les sous-scénarios qui offrent les moins bonnes performances sur le plan technique sont ceux qui incluent le dragage mécanique des sédiments contaminés avec (A1) et sans (C2) la réinsertion et le confinement des sédiments dans la fosse centrale.

D'un point de vue économique, le statu quo (D) n'a pas son égal et ressort à la première position peu importe la méthode. En effet, bien que les coûts indirects soient élevés, le coût initial de l'inaction est nul, ce qui en fait un scénario économique à court terme. Cependant, il faut garder en tête que si le coût de l'inaction est faible, voire nul à court terme, il en est tout autre à long terme. À titre indicatif, le coût annuel associé à l'eutrophisation des lacs et des réservoirs aux États-Unis avoisine les 2,2 milliards de dollars (Dodds et *al.*, 2009). De plus, lorsqu'une problématique environnementale est observée, le statu quo n'est généralement pas une solution à recommander puisqu'il entraine une dégradation des conditions observées, ce qui se traduit par une performance négative sur le plan technique. Les pires sous-scénarios d'un point de vue économique sont ceux où il y a dragage hydraulique des sédiments contaminés avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant (B2 et C1). En effet, ces sous-scénarios doivent prendre en compte un coût additionnel de séparation des phases, de transport et de valorisation des sédiments dragués à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant.

Sur les plans environnementaux et sociaux, la première position est tenue par B1 et est suivie de près par les sous-scénarios B2, C1 et A2 dépendamment de la méthode multicritères retenue et du critère analysé. À l'opposé, les sous-scénarios A1, C2 et D occupent les dernières places pour ces critères peu importe la méthode. En d'autres mots, le recouvrement actif seul (B1), le dragage hydraulique seul (B2) ainsi que la combinaison de ces deux procédés sur l'une ou l'autre des zones à haute contamination (A2 et C1) sont meilleurs que le dragage mécanique (A1 et C2) et le statu quo (D) d'un point de vue environnemental et social.

# Chapitre 5 Discussion

Dans ce chapitre, une attention particulière est portée aux résultats obtenus à l'aide des deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées de même qu'aux étapes préliminaires qui ont permis leur utilisation. Dans un premier temps, une discussion est réalisée et porte sur les résultats obtenus et présentés au chapitre 4. Les sous-scénarios construits pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin sont ensuite commentés et différentes variantes aux procédés retenus pour la construction de ces sous-scénarios sont présentées. Différents commentaires et réflexions portant sur les étapes préliminaires à l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision sont ensuite ajoutés à la discussion afin d'identifier diverses recommandations, ouvertures et perspectives possible. Enfin, quelques commentaires préalables à la réalisation d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle au lac Saint-Augustin sont formulés.

## 5.1 Les résultats des méthodes multicritères d'aide à la décision

L'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision comme outils pour identifier le ou les meilleur(s) scénario(s)/sous-scénario(s) pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin est préliminaire à une éventuelle mise en œuvre à grande échelle. Pour le cas du lac Saint-Augustin, sept sous-scénarios ont d'abord été construits, puis évalués, confrontés les uns aux autres et hiérarchisés à l'aide de deux méthodes multicritères d'aide à la décision. Il faut rappeler ici que les méthodes multicritères d'aide à la décision révèlent les sous-scénarios qui sont plus performants que les autres à l'égard de critères et de sous-critères bien définis. En conséquence, il n'existe pas une solution unique à appliquer au lac Saint-Augustin mais des solutions qui performent mieux que d'autres sur la base de critères et de sous-critères communs.

À la lumière des résultats présentés au chapitre 4, les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin se divisent selon 3 sous-groupes distincts : les meilleurs sous-scénarios, les sous-scénarios intermédiaires et les pires sous-scénarios. Peu importe la situation de l'analyse de sensibilité dans le cas de la méthode

hiérarchique multicritères et selon la méthode ordinale de Holmes également, les sous-scénarios compris dans ces sous-groupes sont toujours les mêmes.

Les meilleurs sous-scénarios incluent la coagulation à l'alun suivie du confinement des contaminants par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur l'ensemble des zones les plus contaminées du lac (B1) ainsi que le dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant (B2). Ces deux sous-scénarios occupent les première ou deuxième places peu importe la situation de l'analyse de sensibilité dans le cas de la méthode hiérarchique multicritères et selon la méthode ordinale de Holmes également. Il s'agit donc de sous-scénarios robustes sujets à plaire à une majorité d'acteurs impliqués ou touchés par les retombées d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin.

À l'opposé complètement, il y a le sous-groupe des pires sous-scénarios qui inclut le statu quo (D) de même que les sous-scénarios de dragage mécanique des sédiments des zones I, III et IV avec (A1) ou sans (C2) réinsertion et confinement des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin. Peu importe la situation de l'analyse de sensibilité dans le cas de la méthode hiérarchique multicritères et selon la méthode ordinale de Holmes également, les sous-scénarios de dragage mécanique (A1 et C2) des sédiments occupent les dernières positions au classement global des sous-scénarios. À l'inverse de B1 et B2, les sous-scénarios A1 et C2 sont ainsi sujets à déplaire à une grande majorité d'acteurs impliqués ou touchés par les retombées d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. De plus, les résultats du chapitre 4 indiquent également que le statu quo (D) est une solution préférable aux sous-scénarios de dragage mécanique des sédiments contaminés (A1 et C2) du lac Saint-Augustin en toutes circonstances. Autrement dit, mieux vaut ne rien faire plutôt que de procéder au dragage mécanique des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin.

Au milieu, il y a le sous-groupe des sous-scénarios intermédiaires qui inclut essentiellement les sous-scénarios hydrides combinant dragage hydraulique des zones I, III et IV avec (A2) ou sans (C1) réinsertion et confinement des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin.

À l'exception des sous-scénarios de dragage mécanique des sédiments contaminés (A1 et C2), les résultats du chapitre 4 montrent bien que les autres sous-scénarios d'action (A2, B1, B2 et C1) sont généralement préférables à l'inaction (D) selon la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes. Le seul cas où D arrive en 3$^{e}$ position est la situation II de la méthode hiérarchique multicritères dans laquelle un poids plus important est alloué au critère économique. Dans tous les autres cas, le statu quo (D) arrive en 5$^{e}$ position tout juste devant les sous-scénarios de dragage mécanique (A1 et C2) des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Les sous-scénarios D, A1 et C2 pourraient donc être retirés de l'analyse et les sous-scénarios restants (A2, B1, B2 et C1) pourraient subir une investigation supplémentaire.

## 5.2 Les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés

Au total et en excluant le statu quo, six sous-scénarios d'action ont été définis à partir de trois procédés de gestion des sédiments contaminés : la coagulation du phosphore particulaire et des colloïdes suivie du confinement des contaminants par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif, le dragage hydraulique et le dragage mécanique. De plus, tous les sous-scénarios construits à partir de ces procédés touchent les mêmes zones du lac : les zones où les niveaux de contamination retrouvés dans les sédiments sont les plus importants. En conséquence, certains des sous-scénarios d'action construits pour ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin se ressemblent et affichent des scores de performance relativement similaires.

Prenons le cas de la situation I de la méthode hiérarchique multicritères, où les poids alloués à chaque critère sont égaux entre eux et dont les scores de performance par sous-scénario sont montrés à la figure 36 du chapitre 4. On y constate visuellement que les sous-scénarios A1 et C2 de même que A2 et C1 offrent sensiblement les mêmes scores de performance finaux lorsque les poids des critères sont égaux. Dans le cas des sous-scénarios de dragage hydraulique des zones I, III et IV (A2 et C1), l'écart entre les scores de performance de ces deux sous-scénarios se creuse dans les autres situations de l'analyse de sensibilité, contrairement aux sous-scénarios de dragage mécanique (A1 et C2). Rappelons que la seule différence entre A1 et C2 de même que A2 et C1 est liée à ce qu'il

advient des sédiments une fois dragués par l'un ou l'autre des procédés de dragage. Dans un cas, les sédiments dragués sont réinsérés et confinés dans la fosse centrale (A) ou encore valorisés à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant dans l'autre (C).

Nonobstant, quelques commentaires importants sont à formuler concernant les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin. Ces commentaires portent notamment sur les caractéristiques techniques, économiques, environnementales et sociales considérées pour chaque sous-scénario et permettent d'introduire une notion d'incertitude dans l'évaluation des sous-scénarios à l'égard du barème d'évaluation.

### 5.2.1 Quelques commentaires importants concernant les scénarios de gestion des sédiments contaminés

Le premier commentaire touche les sous-scénarios où il y a réinsertion et confinement des sédiments contaminés dans la fosse centrale du lac Saint-Augustin (A1 et A2). La réinsertion des sédiments contaminés n'est pas un procédé qui a été testé à l'occasion du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. En conséquence, les caractéristiques techniques et environnementales des sous-scénarios qui incorporent ce procédé sont plus difficiles à estimer. L'appréciation des sous-scénarios A1 et A2 pour certains des sous-critères techniques, environnementaux et sociaux peut donc présenter une marge d'erreur un peu plus grande en comparaison avec les autres sous-scénarios pour lesquels les procédés ont tous été testés dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. C'est notamment le cas pour les sous-critères techniques de performance du traitement et d'augmentation de la turbidité/potentiel de relargage des contaminants, le sous-critère environnemental de récupération de l'écosystème après implantation de la solution de même que le sous-critère social de gain social/restauration des usages du lac.

Toutefois, les données et informations recueillies dans la littérature en combinaison avec la connaissance de la contamination des sédiments du lac Saint-Augustin et des principaux facteurs qui favorisent le relargage des contaminants permettent une première estimation très réaliste pour l'évaluation des sous-scénarios A1 et A2 à l'égard de tous les sous-

critères de la décision, y compris les sous-critères listés ci-dessus. De plus, le plan d'entretien et de suivi proposé à la section 4.2.4 pour les sous-scénarios A1 et A2 a été adapté de manière à collecter les informations manquantes qui n'ont pas été collectées dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin en ce qui concerne la réinsertion des sédiments. Les informations manquantes incluent notamment la mesure du relargage des contaminants dans la colonne d'eau lors des opérations de réinsertion et le suivi étroit de la performance associée à un procédé combinant réinsertion et confinement des sédiments contaminés en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau.

Un deuxième commentaire concerne les caractéristiques techniques de chaque sous-scénario de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin. En effet, ces caractéristiques présentées à la section 4.1 pour chaque sous-scénario sont données pour le cas où la remise en suspension des sédiments après l'intervention est contrôlée au maximum. Si la remise en suspension des sédiments après l'intervention n'est pas contrôlée, les caractéristiques présentées à la section 4.1 pour tous les sous-scénarios sont imprégnées d'une incertitude additionnelle. En conséquence, les embarcations motorisées et les hydravions doivent absolument faire l'objet d'une règlementation particulière afin d'assurer la pérennité, la durabilité et l'efficacité des sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. À propos, la mise en application d'une telle règlementation correspond à l'un des objectifs spécifiques du plan directeur du lac Saint-Augustin (EXXEP, 2003) qui n'est toujours pas réalisé à ce jour. Par ailleurs, les résultats préliminaires obtenus par le sondage de l'annexe E mettent en évidence que le retrait des embarcations motorisées et des hydravions du lac Saint-Augustin n'entraîne pas nécessairement une nuisance chez les personnes sondées.

Un troisième commentaire concerne la performance technique considérée pour chaque procédé retenu pour la construction des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau. En effet, la mesure de ces performances se base sur deux à trois mois de données récoltées à l'occasion des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin réalisés respectivement en 2009 et en 2011. Les performances

techniques des procédés testés dans les deux volets n'ont pas été déterminées à plus long terme et pourraient affecter les résultats obtenus par l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision advenant le cas où ces performances seraient très différentes de celles qui ont été considérées à la section 4.1. Par exemple, le dragage mécanique des sédiments ne s'est pas accompagné d'un rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau lors du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Constantin et *al.*, 2012). Toutefois, comme les eaux du lac Saint-Augustin se renouvellent complètement environ 2 fois par année, il est possible qu'une diminution des concentrations en phosphore soluble suite au dragage mécanique des sédiments puisse être observée sur une plus longue période que celle qui a été considérée pour la réalisation des essais à l'échelle pilote.

Enfin, les sous-scénarios qui incluent le procédé de confinement des sédiments à travers la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur l'une ou l'autre des zones fortement contaminées du lac Saint-Augustin sont nombreux (A1, A2, B1, C1 et C2). L'inévitable saturation du matériau de recouvrement fait en sorte qu'une attention particulière doit être portée au suivi de la qualité de l'eau et sur la saturation en phosphore du milieu traitant afin d'apporter les mesures correctives et/ou d'entretien qui s'imposent dans les temps voulus. Le plan d'entretien et de suivi de la section 4.2.4 a d'ailleurs été réalisé en conséquence pour les sous-scénarios qui incluent le confinement des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin.

### 5.2.2 La prise en compte de l'incertitude

Au final, les commentaires présentés dans la section précédente font naître une notion d'incertitude sur les caractéristiques techniques de même que sur les évaluations économiques, environnementales et sociales de chaque sous-scénario proposé pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. En effet, l'évaluation des sous-scénarios à l'égard du barème d'évaluation pour chaque sous-critère est influencée par des incertitudes sur les données techniques, économiques, environnementales et sociales qui caractérisent chaque sous-scénario. Cette incertitude est importante à mentionner puisqu'elle peut avoir un impact sur les résultats obtenus à travers l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision.

En plus des exemples donnés à travers les commentaires de la section précédente, prenons un autre exemple très simple pour bien illustrer la notion d'incertitude sur les données qui caractérisent les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. L'évaluation économique des sous-scénarios est fortement dépendante du taux de change utilisé. Si le taux de change est modifié, les estimés économiques changent eux-aussi et le résultat de l'évaluation des sous-scénarios à l'égard du barème d'évaluation pour les sous-critères économiques peut en être affecté. Si tel est le cas, les intrants donnés aux deux méthodes multicritères d'aide à la décision ne sont plus les mêmes et les résultats obtenus à travers leur utilisation sont sujets à changement. En d'autres mots, l'incertitude sur les données qui caractérisent chaque sous-scénario induit une incertitude sur le résultat de l'évaluation de ces sous-scénarios à l'égard du barème d'évaluation. Si un changement survient dans les résultats de l'évaluation des sous-scénarios à l'égard du barème d'évaluation, les intrants aux méthodes multicritères d'aide à la décision sont modifiés, tout comme sont sujets à l'être les résultats obtenus par leur utilisation.

Afin de prendre en considération l'incertitude sur les données qui caractérisent chaque sous-scénario, les sous-critères les plus importants au sein d'un critère d'attache peuvent servir d'indicateurs. Une approche possible est de créer des situations de type « meilleur cas » et « pire cas » dans l'évaluation de chaque sous-scénario au respect du barème d'évaluation pour chacun des sous-critères ou encore pour les sous-critères les plus importants. Les sous-critères qui influencent le choix final peuvent alors être ciblés et investigués davantage afin de réduire l'incertitude pour une prise de décision plus éclairée.

### 5.2.3 Les variantes des procédés utilisés pour la construction des scénarios

Les procédés choisis pour la construction des scénarios incluent la coagulation du phosphore particulaire et des colloïdes suivie par le confinement des contaminants, le dragage hydraulique et le dragage mécanique. Ces procédés ont tous été testés à l'aide d'essais en enclos dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin et ont montrés des résultats très encourageants. Cependant, plusieurs variantes de ces procédés existent dans la littérature et n'ont pas été testées à l'échelle pilote au lac Saint-Augustin. Comme ces variantes pourraient très bien servir pour la construction de scénarios

de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin, une discussion s'impose afin d'identifier diverses ouvertures et perspectives possibles.

Les sous-scénarios où il y a dragage des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin font intervenir le dragage hydraulique à succion (A2, B2 et C1) ou le dragage mécanique (A1 et C2). Les dragues choisies dans les caractéristiques techniques des sous-scénarios sont cohérentes avec les outils de dragage utilisés lors du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Cependant, il existe d'autres types de dragues mécaniques et hydrauliques qui n'ont pas été testées à l'échelle pilote et qui pourraient néanmoins être utilisées pour la construction de scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Par ailleurs, en plus des dragues mécaniques et hydrauliques usuelles, il y a les dragues environnementales qui ont été développées spécialement pour répondre aux contraintes environnementales de sites contaminés et qui pourraient également être utilisées pour la construction de sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Les dragues environnementales incluent la vis d'Archimède, la drague balayeuse, la drague racleuse, l'éco-drague, la benne preneuse environnementale, etc., pour n'en nommer que quelques-unes (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Une étude de faisabilité concernant l'utilisation de ces dragues pour la restauration du lac Saint-Augustin pourrait être conduite afin de valider si les dragues retenues dans les scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés sont réellement les plus performantes compte tenu de la nature des sédiments et de la réalité du site.

Une fois dragués, les sédiments contaminés sont stockés temporairement ou définitivement aux abords des zones d'extraction et font l'objet d'un prétraitement visant à séparer les phases liquide et solide. Dans les sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin, la polymérisation suivie de la filtration à travers un sac filtrant est le prétraitement choisi pour les sous-scénarios de dragage hydraulique (A2, B2 et C1) et la séparation gravitaire par décantation est choisie pour les sous-scénarios de dragage mécanique (A1 et C2). Il existe cependant bien d'autres méthodes pour procéder à la séparation des phases en présence après l'étape du dragage. Ces méthodes incluent l'hydrocyclone, le classificateur à vis hélicoïdale, la déshydratation, l'évaporateur, le filtre presse, etc., pour n'en nommer que quelques-unes. À propos, la séparation des phases à

l'aide d'un hydrocyclone a été étudiée spécifiquement pour le cas du lac Saint-Augustin dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration de ce lac. Ce mode de prétraitement n'a toutefois pas été retenu pour la construction des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés puisque la séparation obtenue avec l'hydrocyclone n'était pas de bonne qualité (Constantin et *al.*, 2012).

Par ailleurs, de nombreux matériaux sont reconnus pour leur capacité à absorber le phosphore contenu dans l'eau et pourraient remplacer la pierre calcaire choisie pour les sous-scénarios où il y a confinement des sédiments (A1, A2, B1, C1 et C2) advenant le cas où leur potentiel d'absorption en phosphore serait plus grand. La calcite ($CaCO_3$) est l'agent actif retrouvé sur la pierre calcaire qui donne à ce matériau de recouvrement la performance qu'on lui reconnait. Cependant, la calcite pure porte aussi le nom de pierre blanche et est retrouvée en grande quantité au Québec dans la région du Saguenay Lac Saint-Jean. La performance d'un procédé utilisant la pierre blanche comme matériau de recouvrement actif n'a pas été spécifiquement mesurée pour le cas du lac Saint-Augustin à l'échelle pilote. Toutefois, un entretien téléphonique réalisé avec Laval Gaudreault de la compagnie Calcite du Nord inc. a révélé que l'utilisation de la pierre blanche au lieu de la pierre calcaire comme matériau de recouvrement engendrerait une augmentation très importante des coûts d'implantation. En effet, les coûts bruts de la pierre blanche et de son transport du Lac St-Jean jusqu'au lac Saint-Augustin en 2011 sont respectivement de 50,75 $/t.m et 29,47 $/t.m, (Laval Gaudreault, Calcite du Nord inc.) contrairement à 13,75 $/t.m et 6,90 $/t.m pour la pierre calcaire (Jean-Philippe Gravel, Carrière Union ltée.).

Certains matériaux naturels sont aussi reconnus pour leur capacité à absorber le phosphore et incluent l'apatite, la dolomite et l'aluminite, pour n'en nommer que quelques-uns. Certains sous-produits industriels comme les cendres volantes ont aussi montré une affinité pour le phosphore. Il existe également une bonne variété de matériaux synthétiques qui permettent le confinement du phosphore contenu dans les sédiments d'un lac eutrophe (Vohla et *al.*, 2011). L'utilisation d'un sous-produit industriel permet de récupérer un déchet produit par une industrie en tant que matière première pour la mise en œuvre d'une stratégie de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Des études

supplémentaires de faisabilité et de performance sont toutefois requises avant d'envisager l'utilisation de tels matériaux de recouvrement pour l'inactivation et le confinement du phosphore à l'échelle du lac Saint-Augustin.

## 5.3 Commentaires et réflexions sur la méthodologie

Les deux méthodes multicritères d'aide à la décision retenues afin de proposer un scénario pour la meilleure gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin ont été sélectionnées parmi un éventail de méthodes multicritères disponibles dans la littérature. La méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes sont respectivement une méthode avec un critère de synthèse et une méthode de rang. Bien que ces deux méthodes appartiennent à deux catégories différentes de méthodes multicritères d'aide à la décision, elles ont tout de même donné les mêmes résultats pour l'identification d'un scénario qui offre le meilleur compromis pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Toutefois, en dépit des résultats obtenus, des commentaires et réflexions s'imposent sur le choix des critères et des sous-critères, la participation du public, le barème d'évaluation et les limites des méthodes multicritères choisies en lien avec les résultats obtenus pour ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin.

### 5.3.1 Le choix des critères, des sous-critères et de leurs importances relatives

La première étape à franchir est de bien définir l'objectif poursuivi à travers l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision. Ici, l'objectif visé à travers l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes est d'identifier le ou les meilleur(s) scénario(s) parmi un éventail de scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Pour ce projet de maîtrise, les méthodes multicritères d'aide à la décision sont donc utilisées comme outils afin de répondre au but de ce projet.

Vient ensuite la sélection et la définition des critères et des sous-critères à utiliser dans le processus décisionnel. Si la sélection des critères peut paraître simple, le choix des sous-critères qui s'y rattachent est légèrement plus complexe. En effet, le nombre de sous-critères par critère doit être suffisamment élevé pour permettre une évaluation rigoureuse

des scénarios sur chaque critère sans toutefois complexifier inutilement la prise de décision parce que les sous-critères sont trop nombreux. Dans le cas présent, quatre sous-critères sont associés aux critères économique et environnemental et cinq sous-critères se rattachent aux critères technique et social. Bien que le nombre de sous-critères par critère ne soit pas égal d'un critère à l'autre, la différence ne crée pas de débalancements trop exagérés. Néanmoins, une distribution trop inégale des sous-critères par critère a pour effet de diluer leur importance dans la décision finale si leur nombre est plus élevé au sein d'un critère en particulier (Sparrevik et *al.*, 2011).

Tel que décrit au chapitre 3, le choix des critères et des sous-critères retenus pour ce projet de maîtrise a été réalisé en fonction d'une revue de la littérature portant sur l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères et de la méthode ordinale de Holmes en contexte environnemental. Il en va de même pour les importances relatives des sous-critères au sein de leur critère d'attache qui ont été fixées dès le départ et sont demeurées invariables dans les deux méthodes multicritères d'aide à la décision retenues en vue de proposer un scénario pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Enfin, les situations à représenter à travers une analyse de sensibilité sur les importances relatives des critères entre eux pour la méthode hiérarchique multicritères sont des situations générales choisies par l'utilisateur de manière à permettre le regroupement de groupes d'acteurs pour simplifier l'analyse.

Une autre approche possible pour déterminer les importances relatives à accorder aux critères et aux sous-critères de la décision est de consulter les différents acteurs et parties prenantes impliquées et touchées par les retombées d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. De cette manière, des situations plus représentatives peuvent être créées au sein d'une analyse de sensibilité sur les importances relatives des critères entre eux. Il en va de même pour les importances relatives des sous-critères qui peuvent également faire l'objet de situations au sein d'une analyse de sensibilité. Une méthode disponible pour consulter les parties prenantes sur les importances relatives à allouer aux critères et aux sous-critères consiste en l'utilisation d'un questionnaire dans lequel le poids des critères et de leurs sous-critères respectifs sont comparés deux à deux. Les acteurs et parties prenantes doivent donc d'abord être identifiés,

puis regroupés et sondés de manière à définir les critères et les sous-critères importants à leurs yeux et dans quelle mesure les uns sont plus importants que les autres. Néanmoins, une approche par revue de la littérature a ici été préférée à une approche participative des acteurs et parties prenantes impliqués pour plusieurs raisons.

D'abord, l'analyse de sensibilité a été réalisée seulement sur les importances relatives des critères entre eux et non sur les importances relatives des sous-critères. Lorsqu'il s'agit uniquement de faire varier les importances relatives de quelques critères entre eux, il est relativement intuitif de créer des situations générales permettant de regrouper ensemble les points de vue de différents groupes d'acteurs.

De plus, en ce qui a trait aux importances relatives à allouer aux sous-critères de la décision, un travail très préliminaire à ce projet de maîtrise et s'inscrivant au sein d'un stage de recherche de 4 mois a été réalisé en 2010 et portait sur l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères pour le choix d'un scénario de réhabilitation au lac Saint-Augustin. Dans le rapport de stage, les importances relatives de plusieurs des sous-critères qui ont été conservés dans ce projet de maîtrise ont été déterminées par consultations publiques de personnes appartenant à différents domaines spécialisés. En complément, les informations additionnelles recueillies dans la littérature portant sur l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes en contexte environnemental ont été jugées suffisantes pour l'attribution objective des importances relatives à l'ensemble des sous-critères de la décision dans ce projet de maîtrise.

Enfin, une limitation dans le temps peut rendre impossible la consultation des différents acteurs et parties prenantes touchés par la mise en œuvre d'un projet de gestion en environnement. Si l'identification des parties prenantes peut paraître relativement simple, il est beaucoup plus difficile de récolter toute l'information nécessaire d'un seul coup et dans des délais raisonnables pour chaque groupe de parties prenantes. De plus, la consultation publique par sondage relève davantage du domaine des sciences sociales que du domaine de l'ingénierie. Néanmoins, le public a quand même été consulté dans ce projet de maîtrise non pas sur les importances relatives qu'il faut allouer aux critères et aux sous-critères de la décision mais plutôt sur la construction d'un barème d'évaluation pour les sous-critères sociaux.

Afin d'illustrer la contrainte de temps qui peut survenir lors de la consultation des acteurs et des parties prenantes touchés par les retombées d'un projet environnemental, prenons l'exemple mentionné ci-dessus et portant sur la construction du barème d'évaluation des sous-critères sociaux. La construction du barème d'évaluation des sous-critères sociaux a été réalisée à l'aide des résultats préliminaires du sondage de consultation de l'annexe E en collaboration avec le Conseil de Bassin du lac Saint-Augustin (CBLSA). Le CBLSA devait assurer un lien de communication avec les riverains directement touchés par les nuisances appréhendées d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Or, le CBLSA a émis quelques réserves concernant certaines questions et désirait contrôler une partie de l'information véhiculée à travers le sondage de consultation, en particulier l'information concernant les coûts et l'accessibilité financière des scénarios par les contribuables. En conséquence, la distribution du sondage aux riverains n'a jamais eu lieu, la collaboration du CBLSA s'est limitée à faire remplir le sondage par les membres de son conseil d'administration et les délais se sont étirés sur plusieurs mois. Cette expérience montre bien qu'une bonne collaboration et une bonne entente entre les parties prenantes et l'utilisateur des méthodes multicritères d'aide à la décision sont absolument essentielles au processus décisionnel lors de la consultation des parties prenantes touchées par les retombées d'un projet environnemental.

### 5.3.2 Le barème d'évaluation et les scénarios de gestion des sédiments contaminés

Une fois les scénarios/sous-scénarios construits et les critères/sous-critères bien définis, un barème d'évaluation doit être élaboré de manière à accorder un rang de performance pour chaque scénario/sous-scénario à l'égard de chaque sous-critère. Ce barème d'évaluation est conçu par l'utilisateur des méthodes multicritères d'aide à la décision et se doit d'être le plus objectif possible. L'utilisateur doit donc tirer le maximum des données économiques, techniques, environnementales et sociales disponibles afin de bien justifier le barème pour chaque sous-critère tout en demeurant le plus objectif possible.

Toutefois, si la justification des rangs du barème d'évaluation pour certains sous-critères peut paraître très simple, la justification pour d'autres sous-critères peut être plus difficile. Par exemple, pour le sous-critère technique de performance de la solution, le meilleur rang est attribué aux sous-scénarios qui rencontrent l'objectif préalablement fixé de 85 % de

rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau. Le deuxième meilleur rang est attribué aux sous-scénarios qui ne rencontrent pas l'objectif mais qui permettent néanmoins un rabattement supérieur à 50 %, et ainsi de suite. La justification du barème d'évaluation pour le sous-critère technique de performance de la solution est donc relativement facile et intuitive si l'objectif à atteindre est fixé et bien défini dès le départ.

À l'opposé, prenons l'exemple du sous-critère économique d'investissement initial du projet pour lequel le meilleur rang est alloué aux sous-scénarios qui minimisent les coûts. Dans le barème d'évaluation pour ce sous-critère présenté au chapitre 4, le meilleur rang est attribué aux sous-scénarios dont l'investissement initial est inférieur à 3 500 000 $ et le pire rang est alloué aux sous-scénarios dont l'investissement initial est supérieur à 5 500 000 $. Les justifications pour ce sous-critère se basent sur l'évaluation économique de l'investissement initial de chaque sous-scénario à partir duquel est bâti un intervalle de prix. Or, une autre approche serait de consulter le décideur afin de connaître le chiffre réel à ne pas dépasser pour l'investissement initial d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Par exemple, si le chiffre à ne pas dépasser pour l'investissement initial était de 7 000 000$ au lieu de 5 500 000$, un nouvel intervalle pourrait être construit dans le barème d'évaluation au respect des priorités et contraintes financières du décideur qui doit répondre des investissements qu'il fait. Le même raisonnement s'applique naturellement aux autres sous-critères économiques définis pour ce projet au lac Saint-Augustin.

Au final, la décision pour le cas du lac Saint-Augustin risque fort d'être politique et comme la mise en œuvre d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés en est encore au stade des études de faisabilité, le décideur est difficilement identifiable et sa collaboration n'est pas acquise pour l'instant. Tant que le décideur n'est pas identifié de façon concrète et qu'il ne participe pas activement au processus décisionnel, les justifications du barème d'évaluation pour l'ensemble des sous-critères peuvent être affublées d'erreurs d'échelles du même type que celles qui ont été présentées ci-dessus. Par ailleurs, les exemples illustrés ci-dessus montrent bien la pertinence et l'importance d'identifier le décideur et de le faire participer activement dans les étapes préliminaires à l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision.

En plus du décideur, des experts peuvent aussi devoir intervenir afin de peaufiner le barème d'évaluation de certains sous-critères et ainsi réduire les erreurs d'échelles. L'utilisateur des méthodes multicritères ne doit donc pas hésiter à faire appel à eux en cas de besoin. Toutefois pour le cas du lac Saint-Augustin, de nombreux experts ont déjà été sollicités au cours des nombreuses études et expertises réalisées jusqu'à maintenant et prenant pour site d'étude le lac Saint-Augustin. Ces études et expertises ont mené à la publication de rapports qui ont servi notamment pour la description des caractéristiques techniques de même que les évaluations économiques et environnementales des sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Les justifications données pour la plupart des sous-critères économiques, techniques et environnementaux dans le barème d'évaluation ne requièrent donc pas une intervention additionnelle de la part d'experts puisque ceux-ci ont déjà été sollicités auparavant. En fait, le seul expert qui n'avait pas été consulté jusqu'à maintenant et qui a été consulté dans le cadre de ce projet de maîtrise est le public aux prises avec les retombées d'un éventuel projet de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. En fait, le public a ici été appelé à titre d'expert du domaine social pour la construction d'un barème d'évaluation des sous-critères sociaux à l'aide du sondage de consultation de l'annexe E.

### 5.3.4 Les méthodes multicritères d'aide à la décision

Avant de poursuivre plus loin dans cette section, il est important de rappeler que les méthodes multicritères d'aide à la décision sont des outils pour l'aide à la décision et non des boîtes noires qui révèlent de manière absolue la meilleure décision à prendre. La méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes ont été sélectionnées parmi une gamme de méthodes multicritères disponibles dans la littérature et ont permis d'identifier des scénarios plus performants que d'autres pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Certains commentaires et réflexions doivent néanmoins être formulés concernant les méthodes multicritères utilisées dans le but de proposer un scénario pour la meilleure gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin, afin d'identifier diverses ouvertures et perspectives possibles.

Dans le cas de la méthode hiérarchique multicritères et lorsque le principe de composition hiérarchique[19] est respecté, une inversion des scores de performance peut survenir s'il y a ajout ou enlèvement d'un scénario qui ressemble un peu trop à un autre scénario déjà en place (entre deux analyses successives impliquant la méthode hiérarchique multicritères) (Dyer, 1990 ; Schoner and Wedley, 1989). Pour le cas du lac Saint-Augustin, le sous-scénario A1 ressemble beaucoup à C2, et A2 ressemble beaucoup à C1. En fait, la seule différence entre ces deux combinaisons de sous-scénarios qui représentent chacune une méthode de dragage réside dans le mode de gestion des sédiments contaminés une fois extraits du lac. Les sédiments sont ainsi soit réinsérés et confinés dans la fosse centrale du lac (A), soit valorisés à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant (C). Toutefois, bien que certains auteurs y reconnaissent un défaut méthodologique majeur pour le cas de la méthode hiérarchique multicritères, le fondateur de la méthode (Thomas L. Saaty) affirme qu'il est possible de comparer deux scénarios s'ils diffèrent l'un de l'autre de plus de 10 % (Dyer, 1990), ce qui est le cas ici au respect des résultats issus du barème d'évaluation des scénarios pour l'ensemble des sous-critères. Enfin, rappelons que la méthode hiérarchique multicritères a ici été utilisée comme outils afin d'identifier la meilleure solution pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin parmi des scénarios dont le nombre a été fixé dès le départ et est demeuré invariable tout au long de l'analyse.

De plus, bien que la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes soient respectivement une méthode avec un critère de synthèse et une méthode de rang, ces deux méthodes multicritères d'aide à la décision sont aussi respectivement compensatoires et non-compensatoires (André et *al.*, 2010 ; Linkov et *al.*, 2007). Dans les méthodes compensatoires, la faible performance d'un scénario sur un critère/sous-critère peut être compensée par une meilleure performance sur un autre critère/sous-critère. Inversement, les méthodes non-compensatoires éliminent les scénarios dès qu'ils dépassent un seuil inacceptable de non-performance pour un critère/sous-critère, de sorte que seuls les scénarios les plus performants sur l'ensemble des critères/sous-critères à la fois sont conservés (Kulak and Kahraman, 2005 ; Linkov et *al.*, 2005). Par exemple, dans le cas où une contrainte économique force un décideur à fixer un prix plafond pour les différents scénarios d'un projet, les scénarios qui dépassent le plafond sont disqualifiés dès le départ

[19] Voir section 2.5.4.

avec une méthode multicritères non-compensatoire. Inversement, une méthode compensatoire permet de compenser le prix trop élevé d'un scénario par une bonne performance de ce scénario sur un autre critère.

Dans les méthodes compensatoires, il peut arriver qu'un scénario indésirable obtienne malgré tout un bon classement final par rapport aux autres scénarios s'il est très performant sur un critère en particulier. Pour les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés proposés au lac Saint-Augustin, cette situation survient avec le sous-scénario D – le statu quo. Dans la situation II[20] de l'analyse de sensibilité réalisée au sein de la méthode hiérarchique multicritères, l'excellente performance du statu quo sur le critère économique compense largement les performances médiocres obtenues par ce sous-scénario sur les critères technique, environnemental et social. En conséquence, le sous-scénario D – le statu quo, bien qu'indésirable, obtient malgré tout la troisième position au classement global des sous-scénarios proposés au lac Saint-Augustin pour cette situation de l'analyse de sensibilité. À l'inverse, l'utilisation d'une méthode non-compensatoire comme la méthode ordinale de Holmes au lieu d'une méthode compensatoire a permis d'éliminer le sous-scénario D des options disponibles dès le départ puisque celui-ci figure parmi les pires options au classement final des sous-scénarios selon cette méthode.

Les méthodes de surclassement ÉLECTRE et PROMETHEE sont respectivement des méthodes multicritères non-compensatoires ou partiellement compensatoires (Teixeira de Almeida, 2007 ; Linkov et *al.*, 2005 ; Dulmin and Mininno, 2003) qui ont également vu leur popularité augmenter au cours des 10 dernières années dans la littérature environnementale (Huang et *al.*, 2011). L'utilisation de l'une de ces méthodes en plus de la méthode ordinale de Holmes et de la méthode hiérarchique multicritères aurait amené une dimension additionnelle aux résultats obtenus et présentés dans le cadre de ce projet de maîtrise au lac Saint-Augustin. De cette manière, un parallèle plus fort entre les sorties d'une méthode multicritères compensatoire et une autre non-compensatoire ou partiellement compensatoire aurait pu être effectué et ainsi augmenter la robustesse du processus décisionnel entrepris au lac Saint-Augustin.

[20] Approche traditionnelle : {[Tech.] = [Econ.]} > {[Env.] = [Soc.]}.

## 5.4 Commentaires préliminaires à la réalisation à grande échelle

La mise en place d'un scénario de gestion des sédiments contaminés à grande échelle s'accompagne inévitablement d'une discussion sur le partage des coûts d'implantation et à qui revient la facture. Le sondage de consultation distribué pour la construction du barème d'évaluation des sous-critères sociaux a révélé l'existence probable d'un prêt-à-payer pour la restauration du lac Saint-Augustin. Nonobstant, une étude réalisée dans la région du *Mono Basin Scenic Area* (Californie) a mis en évidence une corrélation positive entre l'attachement des riverains et des usagers à un lieu et leur prêt-à-payer. Dans cette étude, l'attachement d'une personne à un lieu se définit à la fois par l'identité et la fonction utile que cette personne reconnait à ce lieu. L'étude montre aussi que l'identité plutôt que la fonction reconnue à un lieu a beaucoup plus tendance à générer une attitude positive face au prêt-à-payer des usagers et des riverains. Le prêt-à-payer semble également plus élevé dans le cas où l'argent récolté sert au maintien des conditions actuelles ou aux initiatives de restauration plutôt que sur des innovations extraordinaires se traduisant par une augmentation des services publics (Kyle et *al.*, 2003). Une telle méthode pourrait être appliquée au lac Saint-Augustin afin d'identifier les facteurs qui motivent le prêt-à-payer des riverains et des citoyens de la ville de Saint-Augustin-de-Desmaures et de la ville de Québec pour la restauration du lac. Un programme de financement adapté au prêt-à-payer des contribuables pourrait alors être proposé et mis en application pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin.

Avant de procéder à la mise en œuvre d'un projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle, il faut aussi s'assurer que toutes les sources externes de contamination sont contrôlées afin de prévenir une éventuelle recontamination des sédiments. Les sources externes répertoriées incluent les sources ponctuelles (émissaires, ouvrages de débordement, décharges industrielles, etc.), les sédiments contaminés de l'amont ou encore les zones contaminées résiduelles après dragage. Le ruissellement, la déposition atmosphérique et l'advection de l'eau souterraine contaminée sont d'autres sources externes possibles de contamination. Quoi qu'il en soit, la recontamination des sédiments n'est certainement pas à prendre à la légère et doit être surveillée après la mise en œuvre d'un projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle. À titre indicatif, une étude

portant sur la revue de l'entretien et du suivi de 20 projets de dragage et/ou de confinement des sédiments contaminés aux États-Unis a révélé que 40 % des sites restaurés ont souffert d'un retour de contamination dû au ruissellement ainsi qu'aux zones de contaminations résiduelles après dragage (Nadeau and Skaggs, 2007).

Comme les sous-scénarios envisagés pour le cas du lac Saint-Augustin ne ciblent pas tous les sédiments du fond du lac, un retour de la contamination n'est pas à exclure et le plan d'entretien et de suivi doit être adapté en conséquence. De plus, il faut s'assurer que les sources externes sont réellement contrôlées au lac Saint-Augustin avant de procéder à la réalisation d'un projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle. À propos, une discussion avec un riverain[21] demeurant près d'un marais aménagé pour traiter les apports par ruissellement urbain provenant de la rive sud du lac a permis de révéler l'ensablement possible de ce marais. Les conséquences qui en découlent incluent la diminution du temps de résidence de l'eau et donc du niveau de traitement offert par le marais. Des investigations supplémentaires sont donc requises.

De plus, la mise en application d'une règlementation visant à interdire les embarcations motorisées et les hydravions sur le lac Saint-Augustin est essentielle afin d'assurer la pérennité des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés. Une telle réglementation permettrait de préserver l'intégrité du matériau de recouvrement actif en plus de minimiser la remise en suspension des sédiments qui affecte la qualité de l'eau. Cette recommandation est d'autant plus importante puisque les sous-scénarios proposés ne ciblent pas la totalité des sédiments contaminés, lâches et non-consolidés du lac Saint-Augustin. À propos, bien que la mise en application d'une telle réglementation corresponde à l'un des objectifs spécifiques du plan directeur du lac Saint-Augustin (EXXEP, 2003), les embarcations de plaisance et les décollages/amerrissages d'hydravions ont été très nombreux au cours de l'été 2011.

[21] Pierre Nazair, MD.

# Chapitre 6 Conclusion et recommandations

Le lac Saint-Augustin est un lac eutrophe et ses sédiments sont lourdement contaminés en phosphore et en métaux lourds. Ce lac représente un risque important tant pour la santé des riverains que pour l'environnement, d'où la nécessité de le restaurer. Le principal apport interne en phosphore provient du fond du lac par relargage (Galvez-Cloutier et *al.*, 2012 ; Brin, 2007 ; Parant, 2007 ; Dominguez, 2004) et contribue à aggraver les problématiques d'eutrophisation actuellement observées au lac Saint-Augustin.

Dans le but de proposer un scénario pour la meilleure gestion possible des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin, différents objectifs spécifiques auxquels devait répondre ce projet de maîtrise ont été identifiés. Suivant ces objectifs spécifiques définis au chapitre 1, les principales conclusions de ce projet de maîtrise peuvent maintenant être énoncées :

1- En plus du statu quo, six sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés sur les zones les plus contaminées du lac Saint-Augustin ont pu être construits à partir des procédés testés à l'échelle pilote (volets 1 et 2). Des données techniques, économiques, environnementales et sociales ont pu être récoltées et adaptées à chacun des sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés :
   a. à partir de la littérature portant sur le lac Saint-Augustin, sur des projets similaires de gestion des sédiments contaminés ainsi que sur les méthodes et procédés généraux de gestion des sédiments contaminés (données techniques, économiques et environnementales) ;
   b. à partir des résultats préliminaires issus de la distribution d'un sondage de consultation (données sociales) ;
   c. à partir des résultats préliminaires issus de la caractérisation des phases en présence après le dragage des sédiments (données environnementales).

2- Des critères et sous-critères ont alors pu être définis et ont permis d'évaluer la performance des sous-scénarios au respect d'un barème d'évaluation spécialement construit en fonction des données économiques, techniques, environnementales et sociales adaptées aux sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés. Deux

méthodes multicritères d'aide à la décision, la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes, ont pu être utilisées et ont permis d'identifier des sous-scénarios plus performants que d'autres. Les deux sous-scénarios qui se démarquent des autres sur leur performance incluent : le sous-scénario de coagulation à l'alun suivie du confinement des contaminants par la mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur l'ensemble des zones les plus contaminées du lac (B1) et le sous-scénario de dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant (B2).

3- La robustesse des sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin a pu être appréciée à travers une analyse de sensibilité réalisée sur les importances relatives des critères entre eux pour la méthode hiérarchique multicritères. Encore une fois, les sous-scénarios identifiés en 2 comme étant ceux qui se démarquent le plus des autres (sous-scénarios B1 et B2) peuvent être qualifiés de robustes. En effet, ceux-ci occupent toujours les deux premières positions au classement global des performances des sous-scénarios pour toutes les situations de l'analyse de sensibilité et peu importe la méthode multicritères d'aide à la décision utilisée. Enfin et pour compléter l'analyse de sensibilité, les deux méthodes multicritères d'aide à la décision sélectionnées ont mené à des résultats qui ont pu être comparés :
    a. globalement en considérant l'ensemble des critères à la fois ;
    b. sur chacun des critères de la décision (économique, technique, environnemental et social).

4- Des recommandations sur la stratégie de gestion des sédiments contaminés à adopter dans le cas du lac Saint-Augustin ont pu être énoncées.

La méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes ont pu être appliquées et utilisées avec succès. Spécifiquement, ces méthodes ont permis de répondre au but de ce mémoire et de proposer des solutions pour la gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. À la lumière des résultats obtenus, deux sous-scénarios

pourraient faire l'objet d'une recommandation de réalisation à l'échelle du lac. Il s'agit notamment des sous-scénarios B1 (coagulation à l'alun suivie par le confinement des contaminants à l'aide d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur les zones les plus contaminées du lac) et B2 (dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant). De plus, les scores de performance obtenus par les sous-scénarios hybrides combinant dragage hydraulique et confinement des contaminants avec ajout préalable d'alun à la colonne d'eau (A2 et C1) sont largement suffisants pour qu'une investigation supplémentaire ait lieu avant une éventuelle intervention à grande échelle au lac Saint-Augustin.

## 6.1 Conclusions de la méthode hiérarchique multicritères et de la méthode ordinale de Holmes

Le sous-scénario où il y a coagulation à l'alun et mise en place d'un matériau de recouvrement actif de pierre calcaire et de sable sur les zones les plus contaminées du lac (B1) et le sous-scénario de dragage hydraulique de ces zones avec polymérisation et filtration des boues pompées à travers un sac filtrant (B2) occupent les deux premières places au classement global des sous-scénarios selon la méthode hiérarchique multicritères et la méthode ordinale de Holmes. De plus et pour les deux méthodes multicritères d'aide à la décision, les sous-scénarios qui comprennent le dragage mécanique des sédiments contaminés (A1 et C2) finissent bon derniers dans le classement et derrière le statu quo (D). Enfin, les places intermédiaires sont occupées par les sous-scénarios hybrides combinant dragage hydraulique et inactivation/confinement des contaminants par coagulation à l'alun et mise en place d'un matériau de recouvrement actif sur l'une ou l'autre des zones les plus contaminées du lac (A2 et C1). En général, les sous-scénarios d'action A2 et C1 occupent un meilleur classement que l'inaction (D).

De plus, l'ordre des positions des sous-scénarios obtenu à l'aide de la méthode ordinale de Holmes est similaire à celui de la méthode hiérarchique multicritères lorsque les poids des critères sont égaux (situation I – l'égalité des poids des critères). Dans le cas de la méthode hiérarchique multicritères, l'analyse de sensibilité réalisée sur les poids des critères de la décision a révélé que les mêmes groupes de sous-scénarios occupent toujours les mêmes

positions peu importe la situation de l'analyse de sensibilité. Ainsi, des groupes de sous-scénarios ont pu être formés selon qu'ils occupent les meilleures places, les places intermédiaires et les dernières places au classement global des sous-scénarios.

## 6.2 Recommandations

À la lumière des discussions et réflexions présentées dans le chapitre 5, les principales recommandations à formuler incluent :

- accroître la participation du public et des parties prenantes dans les étapes préliminaires à l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision ;
    - Identification des critères et des sous-critères de la décision ;
    - Choix des importances relatives des critères et des sous-critères entre eux ;
    - Création de situations plus représentatives des acteurs impliqués au sein d'une analyse de sensibilité.
- réaliser une analyse de sensibilité sur les poids des sous-critères en plus des poids des critères, et augmenter le nombre de situations à représenter au sein de cette analyse afin d'accroître la robustesse du processus décisionnel entrepris au lac Saint-Augustin ;
- prendre en compte l'incertitude sur les données techniques, économiques, environnementales et sociales de chaque scénario/sous-scénario par la création de situations de type « pire cas » et « meilleur cas » ;
- réduire les erreurs d'échelle du barème d'évaluation par l'identification et la participation active du décideur (à identifier) au processus décisionnel ;
- utiliser, en plus des méthodes multicritères choisies pour ce projet de maîtrise, d'autres méthodes multicritères d'aide à la décision incluant des méthodes compensatoires et non-compensatoires ou partiellement compensatoires afin d'augmenter la robustesse du processus décisionnel entrepris au lac Saint-Augustin;
- augmenter la diversité entre les sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés en permettant l'utilisation de variantes aux procédés et/ou matériaux qui ont été testés dans le cadre du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin ;

- réduire le nombre de sous-scénarios en enlevant le statu quo et ceux qui incluent le procédé de dragage mécanique des sédiments contaminés afin de pousser plus loin l'analyse avec seulement les sous-scénarios les plus performants ;
- valider que les sources externes de contamination sont réellement contrôlées avant la réalisation d'un projet de gestion des sédiments contaminés à grande échelle au lac Saint-Augustin.

# Bibliographie


AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE. 2004. *Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*. Rapport développé par l'Agence de l'eau Artois-Picardie, In Vivo inc. et le Pôle de compétence des sites et sédiments pollués. 126 pages.

Alvarez-Guerra M., Viguri J.R. and Voulvoulis N. 2009. *A multicriteria-based methodology for site prioritisation in sediment management*. Elsevier. Environmental International, 35 : 920-30.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION., WATER WORKS ASSOCIATION and WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 1999. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition. USA. 2402 pages.

ANCHOR ENVIRONMENTAL CA, L.P. 2003. *Literature review of effects of resuspended sediments due to dredging operations*. Document prepared for Los Angeles Contaminated Sediments Task Force. Los Angeles : California. 140 pages.

Anctil, F. 2005. *Notes de cours – Eaux-vives (GCI-22459) : Éléments de gestion d'une ressource en mouvement* : Août 2005. Département de génie civil et des eaux. Université Laval : Québec. Automne 2006.

André, P., Delisle, C.E. et Réveret, J.-P. 2010. *L'évaluation des impacts sur l'environnement*. Presses Internationales Polytechniques. 3e edition. Canada. 398 pages.

Anthony, J.L and Downing, J.A. 2003. *Physical Impacts of Wind and Boat Traffic on Clear Lake, Iowa, USA*. Lake and Reservoir Management, 19 (1) : 1-14.

ASSEMBLÉE NATIONALE. 2006. *Projet de loi n°118 – Loi sur le développement durable*. Deuxième session. Trente-septième législature. Assemblée Nationale : Québec. 20 pages (PDF). [Consulté le 18 novembre 2011]; Adresse URL : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=5&file =2006C3F.PDF

ASSOCIATION DES CONSULTANTS ET LABORATOIRES EXPERTS (ACLE). 2011. *Guide de rémunération 2011*. Ingénierie des sols et matériaux, Géoenvironnement, Toiture et étanchéité. 68 pages (PDF). [Consulté le 15 décembre 2011]; Adresse URL : http://www.acle.qc.ca/GUIDE.pdf

Baker, A. 2011. *Les méthodes multicritères d'aide à la décision*. Interview réalisée le 23 novembre 2011. Service de l'Environnement. Ville de Québec. Québec.

Birdwell, J.E. and Thibodeaux, L.J. 2007. *A Kinetic Model of Short-Term Dissolved Contaminant Release during Dredge-Generated Bed Sediment Resuspension.* Environmental Engineering Science, 24 (10) : 1431-42.

Bortone, G., Arevalo, E., Deibel, I., Detzner, H.-D., De Propris, L., Elskens, F., Giordano, A., Hakstege, P., Hamer, K., Harmsen, J., Hauge, A., Palumbo, L. and Van Veen, J. 2004.

*Synthesis of the SedNet Work Package 4 Outcomes.* Sediment and Dredged Material Treatment. Journal of Soils and Sediments, 4 : 225-32.

Bouchard-Valentine, M. 2004. *Mémoire : Floraisons de cyanobactéries au lac Saint-Augustin: Dynamique à court terme et stratification.* Département de génie civil. Université Laval : Québec. 129 pages.

Bourget, A., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S. 2011. *Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet 1 : Projet pilote d'évaluation des procédés de traitement par coagulation et recouvrement actif en enclos sur plateforme flottante*. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. 215 pages.

Bourget, A. 2011. *Mémoire : Coagulation à l'alun et recouvrement actif de calcaire pour contrer l'eutrophisation du lac Saint-Augustin (Québec) : Essais in situ en enclos*, Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval : Québec, 279 pages.

Bourget, A., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S. 2010. *Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet II – E2 : Résultats des essais de diffusion du phosphore*. Rapport technique présenté à la ville de Québec. 58 pages.

Brière, F.G. 2006. *Distribution et collecte des eaux*. Presses Internationales Polytechniques. 2e Édition. Canada. 401 pages.

Brin, M.-È. 2007. *Mémoire : Étude de la biodisponibilité des contaminants (éléments traces métalliques et phosphore) contenus dans les sédiments du lac Saint-Augustin*. Département de génie civil. Université Laval : Québec. 182 pages.

Brin, M.-È. et Dominguez, G. 2002. *Projet d'assainissement du lac Saint-Augustin – Volet sédiments contaminés.* Département de génie civil. Université Laval : Québec. 45 pages.

Brossier, G. et Dussaix, A.-M. 1999. *Enquêtes et sondages – Méthodes, modèles, applications, nouvelles approches.* Éditeurs scientifiques. DUNOD. ISBN 2-10-004023-5. Paris. 365 pages.

Campbell, N.A. et Reece J.B. 2004. *Biologie*. Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. (ERPI). 2e Édition. ISBN 2-7613-1379-8. Canada. 1364 pages.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2006. *Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques*. MA. 100 – Lix.com. 1.0. Rév. 4. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. 18 pages.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2009. *Modes de conservation pour l'échantillonnage des eaux de surface*. DR-09-10. Édition 2009-01-27. Révision 2010-02-18. Gouvernement du Québec. 12 pages.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2011. *Détermination des orthophosphates dans l'eau : méthode colorimétrique automatisée à l'acide ascorbique*. MA. 303 – P 1.1. Rév. 1. Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. 12 pages.

CONSORTIUM DDM – PROFAUNE. 2005. *Développement d'un outil de gestion in-situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin (Dossier #33666)*, Rapport technique présenté à la ville de Québec. 106 pages.

Constantin, B., Galvez-Cloutier, R., et Leroueil, S. 2012. *Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet 2 : Inactivation du phosphore par dragage et séparation de phases solide-liquide*. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. Version préliminaire.

Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J. and Tchobanoglous, G. 2005. *Water Treatment – Principles and Design.* MWH. 2nd Edition. John Wiley & Sons Inc. United States of America. 1948 pages.

Del Vicario, M. s.a., *Dredged Material Management: A Regional Perspective*. U.S. Environmental Protection Agency Region 2. New York. National Sediment Bioaccumulation Conference. 2 pages (PDF). [Consulté le 10 novembre 2011]; Adresse URL : http://water.epa.gov/polwaste/sediments/cs/upload/delvic.pdf

DESSAU. 2011. *Essai de deux techniques de restauration au lac Waterloo – Projet pilote*. Rapport final présenté au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Rapport préparé pour la Ville de Waterloo par DESSAU. 321 pages.

Dodds, W.K., Bouska, W.W., Eitzmann, J.L., Pilger, T.J., Pitts, K.L., Riley, A.J., Schloesser, J.T. and Thornbrugh, D.J. 2009. *Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of Potential Economic Damages*. Policy Analysis, Environmental Science & Technology, 43 (1) : 8 pages.

Dominguez, G. 2004. *Mémoire : Étude du phénomène de relargage des sédiments du lac Saint-Augustin*. Département de génie civil. Université Laval : Québec. 134 pages.

Dubé, J.-S. s.a. *Analyses physico-chimiques pour les sols contaminés – Manuel de laboratoire.* Laboratoire d'assainissement. Département de génie civil. Université Laval : Québec. 43 pages.

Dulmin, R. and Mininno, V. 2003. *Supplier selection using a multi-criteria decision aid method*. Journal of Purchasing & Supply Management, 9 (4) : 11=77-187.

Dyer, J.S. 1990. *Remarks on the analytic hierarchy process*. Management Sciences, 36 (3) : 249-58.

Eggleton, J. and Thomas, K.V. 2004. *A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events.* Elsevier. Environment International, 30 : 973-80.

Ellwood, N.T.W., Albertano, P., Galvez, R., Funiciello, R. and Mosello, R. 2009. *Water Chemistry and Trophic Evaluation of Lake Albano (Central Italy): a 4 Year Water Monitoring Study*. J. Limnol., 68 (2) : 288-303.

ENVIRONNEMENT CANADA. 1994. *Répercussions environnementales du dragage et de la mise en dépôt des sédiments*. Document préparé par Les Consultants Jacques Bérubé inc.

pour la Section du développement technologique. Direction de la protection de l'environnement. Régions du Québec et de l'Ontario. N° de catalogue En 153-39/1994F. 109 pages.

ENVIRONNEMENT CANADA et MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2007. *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration*. 39 pages.

EXXEP. 2003. *Plan directeur 2003-2005 du lac Saint-Augustin*. Document préparé pour le Conseil de bassin du lac Saint-Augustin par EXXEP Environnement. 32 pages + 1 annexe.

Fetter, C.W. 1999. *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc. 2nd Edition. United States of America. 500 pages.

Fredette, T.J. and French, G.T. 2004. *Understanding the physical and environmental consequences of dredged material disposal: history in New England and current perspectives*. Elsevier. Marine Pollution Bulletin, 49 (1-2) : 93-102.

Galvez-Cloutier, R., Ferigutti, S. et Dubé, J.-S. 1998. *Approche méthodologique pour la transformation progressive d'un centre de transfert en centre de traitement des substances dangereuses*. Partie 1 : Méthode multicritère pour le choix des technologies de traitement. Vecteur Environnement, 31 (2) : 25-37.

Galvez-Cloutier, R. et Dubé, J.-S. 1998b. *Approche méthodologique pour la transformation progressive d'un centre de transfert en centre de traitement des substances dangereuses*. Partie 2 : Étude de faisabilité du lavage chimique des sols contaminés. Vecteur Environnement, 31 (3) : 30-37.

Galvez-Cloutier, R., Ize, S. et Arsenault, S. 2002. *La détérioration des plans d'eau : Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation*. Vecteur Environnement, 35 (6) : 18-37.

Galvez-Cloutier, R., Brin, M.-È., Dominguez, G., Leroueil, S. and Arsenault, S. 2003. *Quality Evaluation of Eutrophic Sediments at St. Augustin Lake, Quebec, Canada*. Contaminated Sediments : Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442. American Society for Testing and Materials (ASTM) International. West Conshohocken. PA. 2003. 35 : 52.

Galvez-Cloutier, R. et Lefrançois, P.-J. 2005a. *Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et techniques de restauration (Première partie)*. Vecteur Environnement, 38 (3) : 30-38.

Galvez-Cloutier, R. et Lefrançois, P.-J. 2005b. *Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et techniques de restauration (Seconde partie)*. Vecteur Environnement, 38 (4) : 48-54.

Galvez-Cloutier, R., Leroueil, S., et Pérez-Arzola,. 2006. *Le lac Saint-Augustin, sa problématique d'eutrophisation et le lien avec les produits d'entretien de l'autoroute Félix-*

*Leclerc*. Volet II : Évaluation de la qualité des eaux de ruissellement et des eaux souterraines. Rapport technique final 03605'3_06 présenté au ministère des Transports du Québec. 51 pages.

Galvez-Cloutier, R. and Sanchez, M. 2007. *Trophic Status Evaluation for 154 lakes in Québec, Canada : Monitoring and Recommendations*. Water Qual. Res. J. Canada, 42 (4) : 252-68.

Galvez-Cloutier, R. 2009. *Notes de cours – Gestion des déchets dangereux et sites contaminés (GCI-7060)*. 110 pages (PDF). Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. [Consulté le 23 mars 2012]; Adresse URL : http://www.gci.ulaval.ca/professeurs/rgalvez/Extra%2063617/gci63617notes.pdf

Galvez-Cloutier, R. et Guesdon, G. 2011. *Notes de cours – Impacts environnementaux (GCI-3001)*. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. [Consulté le 3 février 2011]; Adresse URL : http://www.gci.ulaval.ca/professeurs/rgalvez/gci21428.html

Galvez-Cloutier, R., K. M. Saminathan, S., Boillot, C., Triffaut-Bouchet, G., Bourget, A. and Soumis-Duguas, G. 2012. *An Evaluation of Several In-Lake Restoration Techniques to Improve the Water Quality Problem (Eutrophication) of Saint-Augustin Lake, Quebec, Canada*. Environmental Management, 49 (5) : 1037-53.

Godin, D. 2011. *La gestion de l'eau dans la vallée de l'Okanagan*. cafEAU. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. 8 novembre 2011.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 2012. *Règlement sur les déchets solides*. [Consulté le 7 février 2012]; Adresse URL : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R13.HTM

Guitouni A. and Martel J.-M. 1998. *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*. European Journal of Operational Research, 109 (2) : 501-21.

Heathcote, I.W. 1998. *Integrated Watershed Management – Principles and practice*. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 414 pages.

Huang, I.B., Keisler, J., and Linkov, I. 2011. *Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of application and trends*. Elsevier, Science of the Total Environment, 409 (19) : 3578-94.

Hubbard A. T. 2002. *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*. Volume 4:Por-Z. Pages 4255-5667. Santa Barbara: California. ISBN: 0-8247-0796-6. 5667p.

INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CENTRE (IETC). 1999. *Planning and Management of Lakes and Reservoirs: An Integrated Approach to Eutrophication*. IETC Technical Publication Series 11. 2nd Edition. ISBN : 92-807-1819-3. 375 pages.

Irvine, K.N., Droppo, I.G., Murphy, T.P. and Lawson, A. 1997. *Sediment Resuspension and Dissolved Oxygen Levels Associated with Ship Traffic: Implications for Habitat Remediation.* Water Qual. Res. J. Canada, 32 (2) : 421-37.

Kiker, G.A., Bridges, T.S., Varghese, A., Seager, T.P. and Linkov, I. 2005. *Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making*. Integrated Environmental Assessment and Management, 1 (2) : 95-108.

Klapper, H. 2003. *Technologies for Lake Restoration.* J. Limnol., 62(Suppl.1) : 73-90.

Kulak, O. and Kahraman, C. 2005. *Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process*. Information Sciences, 170 (1) : 191-210.

Kyle, G.T., Absher, J.D. and Graefe, A.R. 2003. *The Moderating Role of Place Attachment on the Relationship Between Attitudes Toward Fees and Spending Preferences*. Taylor & Francis. Leisure Sciences, 25 : 33-50.

Lahdelma, R., Salminen, P. and Hokkanen, J. 2000. *Using Multicriteria Methods in Environmental Planning and Management*. Environmental Management, 26 (6) : 595-605.

Landry, P.L. 1993. *Expertise et aménagement réalisés au lac Saint-Augustin et à l'intérieur de son bassin versant*. Présenté à la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures. 48 pages + 12 annexes.

Lee-Hyung, K., Choi, E. and Stenstrom, M.K. 2003. *Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments*. Elsevier. Chemosphere 50 (1) : 53-61.

Linkov, I., Satterstrom, F.K., Steevens J., Ferguson, E. and Pleus, R.C. 2007. *Multi-criteria decision analysis and environmental risk assessment for nanomaterials*. Journal of Nanoparticle Research 9 (4) : 543-554.

Linkov, I., Satterstrom, F.K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T. and Ferguson, E. 2006a. *From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications*. Elsevier. Environmental International, 32 (8) : 1072-93.

Linkov, I., Satterstrom, F.K., Kiker, G., Seager, T.P., Bridges, T., Gardner, K.H., Rogers, S.H., Belluck, D.A. and Meyer, A. 2006b. *Multicriteria Decision Analysis : A Comprehensive Decision Approach for Management of Contaminated Sediments*. Risk Analysis, 26 (1) : 61-78.

Linkov, I., Varghese, A., Jamil, S., Seager, T.P., Kiker, G. and Bridges, T. 2005. *Multi-Criteria Decision Analysis: A Framework for structuring remedial decisions at contaminated sites*. Earth and Environmental Sciences, 38 (1) : 15-54.

Lyons, T., Ickes, J.A., Magar, V.S., Asce, M., Albro, C.S., Cumming, L., Bachman, B., Fredette, T., Myers, T., Keegan, M., Marcy, K. and Guza, O. 2006. *Evaluation of*

*Contaminant Resuspension Potential during Cap Placement at Two Dissimilar Sites*. Journal of Environmental Engineering, 132 (4) : 505-514.

Marceau, M., Bouchard, C. et Galvez-Cloutier, R. s.a. *Étude comparative de trois modes de collecte des déchets domestiques dangereux sur le territoire de la CUQ*. 10 pages (PDF). [Consulté le 25 février 2011]; Adresse URL : http://www.gci.ulaval.ca/professeurs/rgalvez/Extra%2063617/CUQ_gestion%20DDD.pdf

Martineau, O. 2009. *Suivi de la qualité de l'eau - lac Saint-Augustin*. Ville de Québec. Service de l'environnement. Division de la qualité du milieu. 36 pages.

Mattson, M.D., Godfrey, P.J., Barletta, R.A. and Aiello, A. 2003. *Eutrophication and Aquatic Plant Management in Massachusetts – Final Generic Environmental Impact Report*. Executive Office of Environmental Affairs, Commonwealth of Massachusetts. 755 pages.

METCALF & EDDY, Inc. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill Higher Education : 4th edition. 1819 pages.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2012. *Critères de qualité de l'eau de surface*. ISBN-978-2-550-64798-0. 510 pages et 16 annexes.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2011a. *Le réseau de surveillance volontaire des lacs – les méthodes.* [Consulté le 15 février 2011]; Adresse URL : http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/rsvl/methodes.htm

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2011b. *Politique de gestion de sols et de réhabilitation de terrains contaminés.* [Consulté le 16 juin 2011]; Adresse URL : http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2.htm#2.1.1%20Grille%20de%20crit%C3%A8res%20g%C3%A9n%C3%A9riques

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2011c. *Tarifs en vigueur*, section autres frais. [Consulté le 5 décembre 2011] Adresse URL : http://www.mddep.gouv.qc.ca/ministere/tarification/mddep.htm#echantillonnage

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2010. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5 – Échantillonnage des sols*. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Québec. Édition courante. 66 pages (PDF). [Consulté le 3 février 2012]; Adresse URL : http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/solsC5.pdf

Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs B.F. 2001. *An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments*. Elsevier. Journal of Hazardous Material, 85 (1-2) : 145-63.

Nadeau, S.C. and Skaggs, M.M. 2007. *Analysis of Recontamination of Completed Sediment Remedial Projects*. Sediment Management Work Group. 10 pages (PDF). [Consulté le 28 novembre 2011]; Adresse URL : http://www.smwg.org/presentations/Battelle/Nadeau%20and%20Skaggs%202007%20-%20Analysis%20of%20Recontamination%20of%20Completed%20Sediment%20Remedial%20Projects.pdf

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1969. *Eutrophication : Causes, Consequences, Correctives*. Proceedings of a symposium. Washington, D.C. United States of America. 661 pages.

OKANAGAN BASIN WATER BOARD. 2010. *Governance Manual*. Okanagan Basin Water Board. Kelowna: British Columbia. 38 pages (PDF). [Consulté le 8 novembre 2011]; Adresse URL : http://www.obwb.ca/structure_governance/

Palermo, M.R. 1998. *Design Considerations for in-situ Capping of Contaminated Sediments*. Elsevier. Wat. Sci. Tech., 37 (6-7) : 315-21.

Palermo, M.R. 1991. *Equipment Choices for Dredging Contaminated Sediments*. Remediation Journal, 1 (4) : 473-92.

Pantazidou, M., Katsiri, A. and Reddy K.R. 2009. *Evaluating Management Options for the Disposal of Dredged Sediments*. Paper ID JAI102159. Journal of ASTM International, 6 (6) : 1-14.

Parant, M.-A. 2007. *Mémoire : Évaluation de la performance en essais en colonnes d'un recouvrement actif pour contrer l'eutrophisation du lac Saint-Augustin (Québec)*. Département de génie civil, Université Laval : Québec. 192 pages.

Park C.S., Pelot, R., Porteous K.C. et Zuo M.J. 2002. *Analyse économique en ingénierie – Une approche contemporaine*. Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. (ERPI) : 2e Édition. Canada. 972 pages.

Penn, M.R., Auer, M.T., Doerr, S.M., Driscoll, C.T., Brooks, C.M. and Effler, S.W. 2000. *Seasonality in phosphorus release rates from the sediments of a hypereutrophic lake under a matrix of pH and redox conditions.* Can. J. Fish. Aquat. Sci., 57 (5) : 1033-41.

Pérez-Arzola, J.-C., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S. 2006. *Le lac Saint-Augustin, sa problématique d'eutrophisation et le lien avec les produits d'entretien de l'autoroute Félix-Leclerc*. Volet I : Hydrogéologie. Premier rapport d'avancement présenté au ministère des Transport du Québec. 31 pages.

Pohekar, S.D. and Ramachandran, M. 2003. *Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review*. Elsevier. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 8 (4) : 365-381.

Prescott, L.M., Harley, J.P. et Klein, D.A. 2003. *Microbiologie*. Éditions de Boeck : 2e Édition française, ISBN 2-8041-4256-6, Paris, 1137 pages.

Roberge, K., Pienitz, R. et Arsenault, S. 2002. *Eutrophisation rapide du lac Saint-Augustin, Québec : étude paléolimnologique pour une reconstitution de la qualité de l'eau*. Le naturaliste Canadien, 126 (2) : 68-82.

Rodriguez-Mendez, R. 2003. *Mémoire : Évaluation des options pour une gestion intégrée des déchets solides municipaux : ville de Zapolitan, Mexique*. Département de génie civil, Université Laval : Québec. 96 pages.

Rydin, E. 2000. *Potentially Mobile Phosphorus in Lake Erken Sediment*. Wat. Res., 34 (7) : 2037-42.

Ryding, S.O. and Rast, W. 1994. *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs*. Masson. Paris. 194 pages.

Saaty, T.L. 1984. *Décider face à la complexité – Une approche analytique multicritère d'aide à la décision.* Collection Université-Entreprise. Entreprise moderne d'édition. Éditions ESF. ISBN : 2-7101-0491-1. Paris. 231 pages.

SAINT-AUGUSTIN-DE-DESMAURES. 2011. *Les résidents disent « OUI » aux travaux du lac Saint-Augustin Nord*. Communiqué pour diffusion immédiate. 2 pages (PDF). [Consulté le 26 octobre 2011]; Adresse URL : http://www.ville.st-augustin.qc.ca/Content/uploads/docs/Reglements/Communiqu%C3%A9%20R%C3%A9f%C3%A9rendum.pdf

Schoner, B. and Wedley, W.C. 1989. *Ambiguous criteria weights in AHP: Consequences and solutions*. Decision Sciences, 20 (3): 462-75.

Sigg, L., Berha, P. et Stumm, W. 2006. *Chimie des milieux aquatiques, Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement*, Dunod : 4e Édition, ISBN : 2-10-050380-4, Paris, 564 pages.

Singhe, I.C. 2010. *Utilisation d'un outil d'aide à la décision pour la sélection d'une méthode optimale de réhabilitation d'un site contaminé : cas du lac Saint-Augustin*. Rapport de stage. Département de génie civil. Université Laval : Québec. 49 pages.

Sondergaard, M., Jensen, J.P. and Jeppensen, E. 2003. *Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes*. Hydrobiologia, 506-509 (1-3) : 135-45.

Soumis-Dugas, G., Triffaut-Bouchet, G., Galvez, R. and Martel, L. 2009. *Ecotoxicological Assessment of an In-Lake Remediation Method*. Paper ID JAI102181. Journal of ASTM International, 6 (4) : 1-14.

Sparrevik, M., Barton, D.N., Oen A.M., Sehkar, N.U. and Linkov, I. 2011. *Use of Multicriteria Involvement Processes to Enhance Transparency and Stakeholder Participation at Bergen Harbor, Norway*. Integrated Environmental Assessment and Management, 7 (3) : 414-25.

Suedel, B.C., Kim, J., Clarke, D.G. and Linkov, I. 2008. *A risk-informed decision framework for setting environmental windows for dredging projects*. Elsevier. Science of the total environment, 403 (1-3) : 1-11.

Teixeira de Almeida, A. 2007. *Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method*. Elsevier. Computers & Operations Research, 34, (12) : 3569-3574.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 2008. *Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments*. Environmental Laboratory. ERDC/EL TR-08-29. September. 302 pages.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 2005. *Los Angeles Regional Dredged Material Management Plan Pilot Studies – Long Term Evaluation of Aquatic Disposal Alternative*. Los Angeles District. Los Angeles. California. September. 149 pages.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) and U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 2004. *Evaluating Environmental Effects of Dredged Material Management Alternatives – A Technical Framework*. EPA842/B-92/008. 1992 : revised 2004. 95 pages.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). 1993. *EPA Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediments*. Office of Water. EPA-823-B93-001. 226 pages.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). 2010. *Lower Duwamish Waterway Superfund Site : T-117 Early Action Area*. Revised EE/CA, Appendix J – Cost Details. 8 pages (PDF). [Consulté le 14 novembre 2011]; Adresse URL : http://www.epa.gov/region10/pdf/sites/ldw/T117/appendix_j_cost.pdf

VILLE DE QUÉBEC. 2009. *Étude de faisabilité technique et économique pour l'extraction, le traitement et la disposition des sédiments du lac Saint-Augustin*. Rapport final préparé par DESSAU. N/Réf. :129-P024118-0103-EN-0001-01. 34 pages.

Virine, L. and Trumper, M. 2008. *Project Decisions – The Art and Science*. Management Concepts inc. United States of America. 333 pages.

Vohla, C., Koiv, M., Bavor, J.H., Chazarenc, F. and Mander Ü. 2011. *Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands – A review*. Elsevier. Ecological Engineering, 37 (1) : 70-89.

Warwick, V.F. 2010. *Notes de cours – Limnologie : Dynamique des écosystèmes d'eaux douces (BIO-3254)*. Département de biologie. Université Laval : Québec. Hiver 2011.

Yong, R.N. and Galvez-Cloutier, R. 1993. *Selective Sequential Extraction Analysis of Heavy-Metals Retention in Soil.* Can. Geotech. J., 30 (5) : 834-47.

Zeman, A.J. 1994. *Subaqueous capping of very soft contaminated sediments.*Can. Geotech. J. 31 (4) : 570-577.

# Annexe A Sommaire des initiatives présentées dans le plan directeur du lac Saint-Augustin

| OBJECTIFS GÉNÉRAUX | OBJECTIFS SPÉCIFIQUES | MOYENS D'ACTION | RESPONSABLES | COÛTS |
|---|---|---|---|---|
| 1. Assurer la mise en œuvre d'un programme de conservation et de restauration du lac Saint-Augustin et de son bassin versant. (Protection de la santé humaine et des écosystèmes). | 1.1 Prévention et contrôle à la source de la « pollution ponctuelle » en vue de protéger les écosystèmes aquatiques et terrestres à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. | 1.1.1 Éliminer le croisement des réseaux sanitaires et pluviaux dans le secteur Sud du bassin versant du lac | VQ | 80 000 $ |
| | | 1.1.2 Gestion des eaux usées des résidences isolées dans le secteur Nord du bassin versant du lac | VQ | 3 550 000 $ |
| | | 1.1.3 Assurer une réglementation concernant l'usage et l'entretien des embarcations à moteur | VQ, CBLSA | 3000 $/an |
| | | 1.1.4 Assurer un suivi de la réglementation d'usage et d'entretien des hydravions | CBLSA, MRN | 5 000 $ |
| | | 1.1.5 Réduire le transport des sédiments et de contaminants au lac en provenance des axes routiers par l'implantation de bassins de sédimentation ou de marais filtrants | CBLSA, MTQ, VQ | 1 530 000 $ |
| | | 1.1.6 Caractériser les sols (phase II) sur les sites potentiellement contaminés à l'échelle du bassin versant | CBLSA | 20 000 $ |
| | 1.2 Prévention et contrôle à la source de la « pollution diffuse » en vue de protéger les écosystèmes aquatiques et terrestres à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. | 1.2.1 Favoriser l'utilisation de produits alternatifs aux pesticides et aux engrais à une échelle appropriée | CBLSA, VQ | 4 000 $/an |
| | | 1.2.2 Mettre en œuvre un programme de restauration des rives | CBLSA | 50 000 $/an |
| | | 1.2.3 Assurer un programme de protection et de reboisement du couvert forestier | CBLSA | 5 000 $/an |
| | | 1.2.4 Effectuer un suivi des pratiques agricoles à l'intérieur du bassin versant du lac Saint-Augustin | CBLSA | 2 500 $/an |
| | 1.3 Assurer un suivi de la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. | 1.3.1 Identifier les flux en nutriments (azote et phosphore) en considérant la dynamique eau / sédiment et suggérer des méthodes de contrôle | CBLSA | 120 000 $ |
| | | 1.3.2 Identifier des solutions pour éliminer le risque à la santé humaine et à l'écosystème associé à la prolifération excessive de cyanobactéries (algues bleu-vert) | CBLSA | 130 000 $ |
| | | 1.3.3 Assurer le maintien du renouvellement des eaux au lac Saint-Augustin d'après les caractéristiques originales du bassin versant | CBLSA, CBRCR | 40 000 $ |
| | | 1.3.4 Suivi de la qualité des eaux (lac et tributaires) | CBLSA | 30 000 $/an |
| | | 1.3.5 Compléter la caractérisation des sédiments | CBLSA | 150 000 $ |
| 2. Développer un programme de mise en valeur du lac Saint-Augustin et de son bassin versant. | 2.1 Assurer la mise en valeur du territoire, autant les caractéristiques naturelles que culturelles. | 2.1.1 Réaliser un plan de mise en valeur du parc riverain au lac Saint-Augustin | VQ | 1 530 000 $ |
| | | 2.1.2 Mise en valeur des éléments culturels et patrimoniaux | CBLSA | 30 000 $ |
| | | 2.1.3 Identifier les terrains en possibilité d'acquisition | CBLSA | 10 000 $ |
| | | 2.1.4 Développer un plan visant la promotion du lac Saint-Augustin comme lieu de loisirs, d'activités physiques, de plein air et de détente, accessible à tous | CBLSA | 10 000 $/an |
| | | 2.1.5 Assurer la protection et l'aménagement d'habitats fauniques (aquatiques et terrestres) | CBLSA | 10 000 $/an |
| 3. Développer des outils de sensibilisation et de communication. | 3.1 Protéger à long terme la qualité de l'environnement par un programme d'éducation relatif à l'environnement. | 3.1.1 Développer et mettre en œuvre une stratégie de communication | CBLSA | 65 000 $/an |

# Annexe B Diagramme de solubilité de l'aluminium

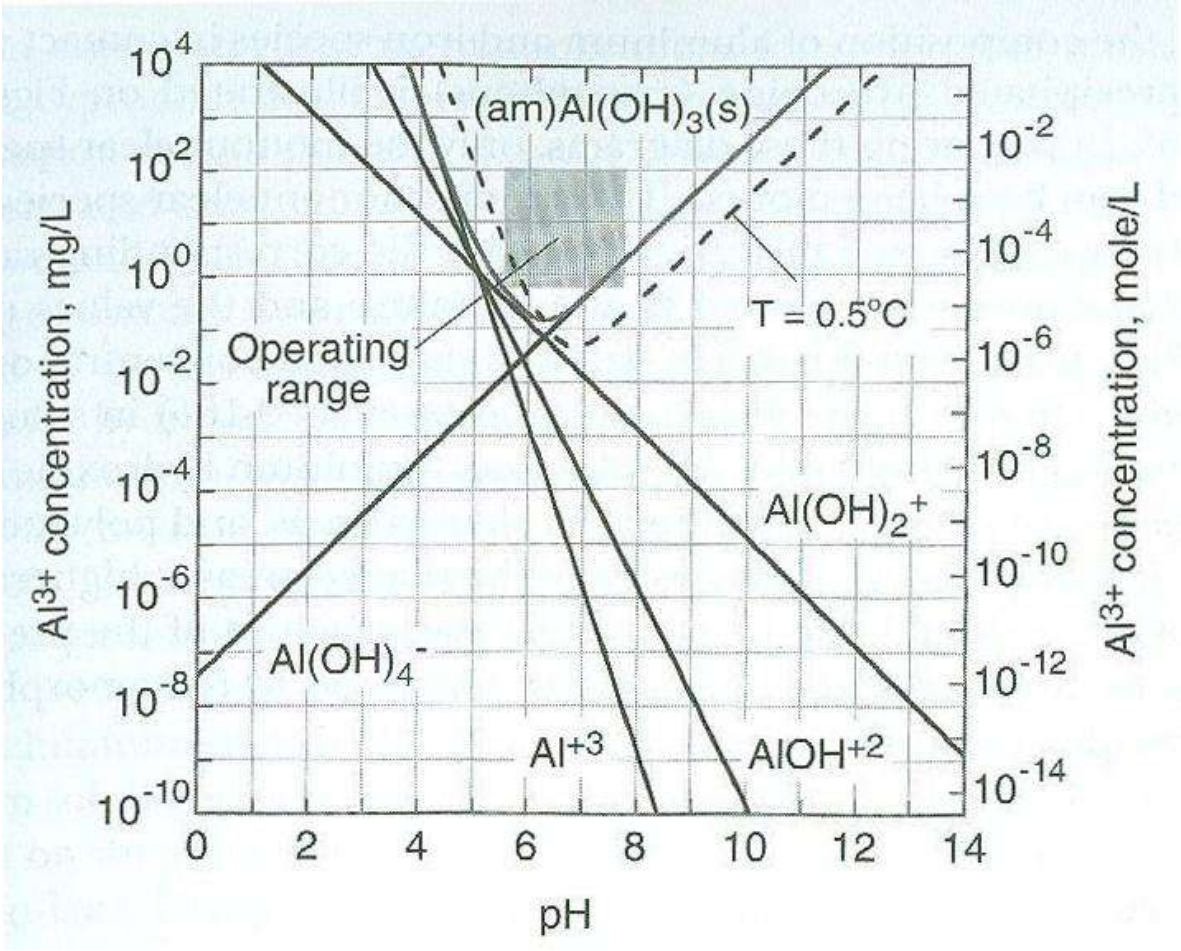


**Figure B - 1 : Diagramme de solubilité de l'aluminium (Tiré de Crittenden et *al.*, 2005)**

# Annexe C Comparaison des critères de sols du MDDEP avec les valeurs retrouvées au lac Saint-Augustin

**Tableau C - 1 : Critères de sols en relation avec les concentrations retrouvées au lac Saint-Augustin**

| MÉTAUX | Critères de sol (mg/kg de sol sec)[22] | | | Situation au lac Saint-Augustin (repris du Tableau 6) |
|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | |
| **Argent (Ag)** | 2 | 20 | 40 | — |
| **Arsenic (As)** | 6 | 30 | 50 | — |
| **Baryum (Ba)** | 200 | 500 | 2000 | — |
| **Cadmium (Cd)** | 1.5 | 5 | 20 | 2,4 |
| **Cobalt (Co)** | 15 | 50 | 300 | — |
| **Chrome (Cr)** | 85 | 250 | 800 | 30,2 |
| **Cuivre (Cu)** | 40 | 100 | 500 | 41 |
| **Étain (Sn)** | 5 | 50 | 300 | — |
| **Manganèse (Mn)** | 770 | 1000 | 2200 | — |
| **Mercure (Hg)** | 0.2 | 2 | 10 | — |
| **Molybdène (Mo)** | 2 | 10 | 40 | — |
| **Nickel (Ni)** | 50 | 100 | 500 | 43,5 |
| **Plomb (Pb)** | 50 | 500 | 1000 | 81,4 |
| **Sélénium (Se)** | 1 | 3 | 10 | — |
| **Zinc (Zn)** | 110 | 500 | 1500 | 298 |

[22] Valeurs tirées de MDDEP (2011b).

# Annexe D Options de gestion associées aux différents niveaux de contamination

**Tableau D - 1 : Options de gestion disponibles selon le niveau de contamination retrouvé dans le sol selon le MDDEP[23]**

| Niveau de contamination | Options de gestion |
|---|---|
| **< A** | Utilisation sans restriction |
| **A-B** | Utilisation comme matériaux de remblayage sur les terrains contaminés à vocation résidentielle en voie de réhabilitation ou sur tout terrain à vocation commerciale ou industrielle, à la condition que leur utilisation n'ait pas pour effet d'augmenter la contamination du terrain récepteur et, de plus, pour un terrain à vocation résidentielle, que les sols n'émettent pas d'odeurs d'hydrocarbures perceptibles.<br>Utilisation comme matériaux de recouvrement journalier dans un lieu d'enfouissement sanitaire (LES).<br>Utilisation comme matériaux de recouvrement final d'un LES à la condition qu'ils soient recouverts de 15 cm de sol propre. |
| **B-C** | Décontamination de façon optimale dans un lieu de traitement autorisé et gestion selon le résultat obtenu.<br>Utilisation comme matériaux de remblayage sur le terrain d'origine à la condition que leur utilisation n'ait pas pour effet d'augmenter la contamination du terrain et que l'usage de ce terrain soit à vocation commerciale ou industrielle.<br>Utilisation comme matériaux de recouvrement journalier dans un LES. |
| **> C** | Décontamination de façon optimale dans un lieu de traitement autorisé et gestion selon le résultat obtenu.<br>Si l'option précédente est impraticable, dépôt définitif dans un lieu d'enfouissement sécuritaire autorisé pour recevoir des sols. |

[23] Information tirée de MDDEP (2011b).

# Annexe E Sondage de consultation et réponses

**CONSULTATION**

**Prise en compte du critère social dans le traitement des sédiments contaminés**

**1. En général, vous sentez-vous concerné par la pollution au lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | 22 | 10 | **32** |
| b) NON | 0 | 0 | **0** |

**2. Depuis combien d'années habitez-vous dans la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures ?**

_____

**Pensez-vous qu'une personne nouvellement résidente dans la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures devrait se sentir concernée par la pollution du lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | 19 | 10 | **29** |
| b) NON | 0 | 0 | **0** |

**3. Par rapport au lac Saint-Augustin, habitez-vous :**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Sur la rive nord ? | 2 | 7 | **9** |
| b) Sur la rive sud ? | 13 | 3 | **16** |

**4. Avez-vous un accès quelconque au lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | | 8 | **8** |
| b) NON | | 2 | **2** |

**5. Avez-vous des enfants ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | 5 | 6 | **11** |
| b) NON | 17 | 4 | **21** |

**6. Pensez-vous que le Conseil de Bassin du Lac Saint-Augustin (CBLSA) est un organisme important et pertinent dans le processus menant à la restauration du lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | 20 | 10 | **30** |
| b) NON | 1 | 0 | **1** |

**7. Selon vous, quel est le rôle que devrait avoir le public dans le processus d'identification de la meilleure solution pour la restauration du lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Le public doit être consulté ou informé à toutes les étapes de la réalisation d'un projet. | 4 | 3 | **7** |
| b) Le public doit être consulté ou informé à la plupart des étapes de la réalisation d'un projet. | 17 | 7 | **24** |
| c) Le public ne devrait pas être consulté du tout. | 1 | 0 | **1** |

**8. Qu'est-ce qui vous dérange <u>le plus</u> concernant le transport par camion ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Le danger et le risque d'accidents accru que représente une plus grande quantité de camions sur les routes. | 12 | 2 | **14** |
| b) Le bruit et/ou la poussière généré par le passage des camions. | 10 | 8 | **18** |

**<u>Légende :</u>**

- JR = Jeux de Rôles
- FG = Focus Groupe [CBLSA]
- Tt = Total des voix

**9. Sachant que les usages du lac pourraient être suspendus lors des travaux, lequel des énoncés suivants représente votre vision sur la durée maximale des travaux au lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) La durée des travaux doit être la plus courte possible. | 4 | 5 | **9** |
| b) Si les travaux débutent en hiver, ceux-ci ne doivent pas entraver la période estivale. | 3 | 1 | **4** |
| c) La durée de l'intervention ne me dérange pas. | 15 | 4 | **19** |

**10. Quelle est l'augmentation du niveau sonore que vous seriez <u>prêt à tolérer</u> lors des travaux de restauration?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Je ne veux <u>aucune</u> augmentation du niveau sonore. | 0 | 0 | **0** |
| b) Je peux tolérer une <u>faible</u> augmentation du niveau sonore (bruit continu que pourrait faire une autoroute lors vous vous trouvez aux alentours). | 9 | 2 | **11** |
| c) Je peux tolérer une augmentation <u>moyenne</u> du niveau sonore (bruit associé aux passages de camions). | 13 | 6 | **19** |
| d) Je peux tolérer une <u>forte</u> augmentation du niveau sonore (bruit d'une tondeuse lors que vous êtes à côté). | 0 | 2 | **2** |

**11. Dans quelle mesure seriez-vous prêt à tolérer les mauvaises odeurs générées lors des travaux de restauration ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Toutes les mauvaises odeurs me dérangent et je ne suis absolument pas prêt à subir une nuisance à ce niveau | 2 | 1 | **3** |
| b) Je pourrais tolérer des mauvaises odeurs pendant un **très court laps de temps** et le moins souvent possible. | 12 | 2 | **14** |
| c) Je peux tolérer les mauvaises odeurs sans problème tant que ça ne dure pas trop longtemps. | 8 | 7 | **15** |

**12. Êtes-vous prêt à tolérer la présence d'infrastructures imposantes au lac Saint-Augustin lors des travaux (ex. : bassin de stockage des sédiments, quai de chargement de matériaux, etc.) ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | 21 | 10 | **31** |
| b) NON | 1 | 0 | **1** |

**13. Lequel des énoncés suivants se rapproche le plus de votre perception face à une alternative de dragage des sédiments.**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Il faudrait à tout prix sortir tous les sédiments contaminés du lac Saint-Augustin et en disposer à l'extérieur de la municipalité. | 9 | 6 | **15** |
| b) Il faudrait concentrer les sédiments contaminés en une seule zone du lac pour ensuite concentrer les efforts de restauration à cet endroit. | 8 | 2 | **10** |
| c) Il ne faudrait pas draguer les sédiments pour ne pas perturber la vie aquatique. | 6 | 1 | **7** |

**14. Si une alternative pouvait atteindre un niveau de performance supérieur avec l'ajout d'un produit chimique moyennant des frais supplémentaires, seriez-vous à priori :**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Favorable à l'utilisation de tels produits ? | 5 | 1 | **6** |
| b) Hésitant/indécis face à l'utilisation de tels produits ? | 13 | 9 | **22** |
| c) Non-favorable à l'utilisation de tels produits ? | 4 | 0 | **4** |

**15. Sachant que les sédiments jouent un rôle très important dans le problème de contamination au lac Saint-Augustin, avec laquelle des solutions suivantes êtes-vous le plus à l'aise à priori ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Recouvrement actif du fond du lac | 9 | 4 | **13** |
| b) Dragage mécanique | 0 | 2 | **2** |
| c) Dragage hydraulique par succion | 13 | 5 | **18** |

**16. Afin d'assurer la <u>pérennité</u> de la décontamination au lac Saint-Augustin, un règlement municipal limitant la taille des moteurs ou interdisant complètement les embarcations motorisées sur le lac doit être adopté. Quel est votre niveau d'acceptation face à l'adoption d'un tel règlement au lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Tout à fait d'accord | 20 | 10 | **30** |
| b) Indifférent | 2 | 0 | **2** |
| c) Totalement en désaccord | 0 | 0 | **0** |

**17. Selon vous, qui devrait avoir la responsabilité de payer pour les travaux de dépollution au lac Saint-Augustin ? <u>Vous pouvez encercler plus d'une réponse.</u>**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Ville de Saint-Augustin | | 5 | **5** |
| b) Ville de Québec | | 5 | **5** |
| c) Gouvernement du Québec | | 5 | **5** |
| d) Citoyens du bassin versant du lac Saint-Augustin | | 0 | **0** |
| e) Toutes ces réponses | | 5 | **5** |

**18. Du point de vue du contribuable (vous), l'option de restauration à choisir au lac Saint-Augustin devrait :**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Atteindre les plus hauts rendements possibles et dépasser les normes en vigueur au Québec. | 13 | 4 | **17** |
| b) Atteindre les normes en vigueur au Québec. | 9 | 6 | **15** |
| c) Coûter le moins cher possible même si on risque de ne pas atteindre les normes en vigueur au Québec. | 0 | 0 | **0** |

**19. Dans quelle mesure êtes-vous ouvert à rendre certaines activités récréatives payantes au lac Saint-Augustin pour financer les travaux de restauration ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Je ne suis pas du tout ouvert à rendre certaines activités payantes pour qui que ce soit. | 4 | 3 | **7** |
| b) Je suis ouvert à rendre certaines activités payantes <u>sauf pour les habitants de la municipalité.</u> | 10 | 3 | **13** |
| c) Je suis ouvert à rendre certaines activités payantes <u>pour tout le monde</u>, y compris les habitants de la municipalité. | 8 | 4 | **12** |

**20. En ce qui a trait à l'importance des impacts naturels à <u>court terme</u> (suspension des activités récréatives, destruction de l'habitat, eaux troubles, eaux de piètre qualité lors des travaux…) pendant et/ou suite aux travaux de décontamination, lequel des énoncés suivants représente au mieux votre position ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Je ne veux aucun impact naturel à court terme! | 0 | 1 | **1** |
| b) Je veux que les impacts naturels à court terme soient minimisés le plus possible. | 14 | 4 | **18** |
| c) Ça ne me dérange pas que les impacts naturels à court terme soient plus élevés si la solution est moins dispendieuse. | 6 | 4 | **10** |

**21. En tant que riverain, comment estimez-vous le gain que vous tireriez avec la possibilité de vous baigner à nouveau sans aucune restriction durant l'été au lac Saint-Augustin ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Je n'y crois pas du tout. | 2 | 0 | **2** |
| b) J'aimerais bien me baigner à nouveau dans le lac Saint-Augustin. | 13 | 3 | **16** |
| c) J'en rêve depuis des années. | 6 | 4 | **10** |
| d) Je ne me baigne jamais alors je n'en tirerais aucun gain. | 1 | 3 | **4** |

**22. En tant que riverain, comment estimez-vous le gain que vous tireriez avec la possibilité de pêcher à nouveau de la truite au lac Saint-Augustin?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Je n'y crois pas du tout. | 2 | 0 | **2** |
| b) J'aimerais bien pêcher à nouveau dans le lac Saint-Augustin. | 15 | 5 | **20** |
| c) J'en rêve depuis des années. | 2 | 2 | **4** |
| d) Je ne me pêche jamais alors je n'en tirerais aucun gain. | 3 | 3 | **6** |

**23. Lequel ou lesquels des usages suivants devraient absolument pouvoir être pratiqué sans soucis au lac Saint-Augustin à la suite de sa dépollution ? Vous pouvez encercler plus d'une réponse.**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Baignade | | 10 | **10** |
| b) Pêche | | 7 | **7** |
| c) Bateaux à moteurs/hydravions | | 0 | **0** |
| d) Canot, kayak, etc. | | 10 | **10** |
| e) Toutes ces réponses | | 0 | **0** |

**24. Si l'implantation de la solution nécessitait un changement dans vos habitudes de vie à moindres coûts, seriez-vous ouvert à venir à des réunions d'informations et à ce sujet ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) OUI | 19 | 10 | **29** |
| b) NON | 3 | 0 | **3** |

**25. À ce jour, y a-t-il une ou plusieurs alternatives qui ne sont toujours pas claires et qui nécessiteraient davantage d'explications ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Recouvrement actif de calcaire et de sable | 10 | 5 | **15** |
| b) Dragage mécanique | 1 | 3 | **4** |
| c) Dragage hydraulique par succion | 1 | 3 | **4** |
| d) Aucune de ces réponses | 12 | 4 | **16** |

## Questions posées lors du jeu de rôle et non lors du focus groupe

**26. En tant que citoyen directement concerné par les retombées positives de la dépollution du lac Saint-Augustin et sachant qu'il pourrait s'agir d'une dépense d'agglomération, quel montant annuel (ordre de grandeur) seriez-vous prêt à avancer pour financer une partie des travaux ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) 0$ : Ce n'est pas à moi de payer pour ça! | 1 | | **1** |
| b) Entre 10$/an et 50$/an | 7 | | **7** |
| c) Entre 50$/an et 100$/an | 11 | | **11** |
| d) Plus de 100$/an | 3 | | **3** |

**27. En ce qui a trait à la restauration des usages du lac à long terme, lequel des énoncés suivant représente au mieux votre position ?**

| | JR | FG | Tt |
|---|---|---|---|
| a) Tous les usages du lac doivent être restaurés à long terme. | 2 | | **2** |
| b) La plupart des usages du lac doivent être restaurés à long terme. | 12 | | **12** |
| c) L'important, c'est de pouvoir se baigner à nouveau dans le lac sans se soucier des cyanobactéries. | 8 | | **8** |

# Annexe F Caractérisation avancée des phases solide et liquide du dragage des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin

L'enlèvement des contaminants à travers le dragage des sédiments est un procédé envisagé dans la construction des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin. Les phases issues du dragage doivent être caractérisées selon les principaux contaminants retrouvés dans les sédiments du lac Saint-Augustin afin de choisir la bonne stratégie de gestion de ces phases après l'extraction des sédiments par dragage. Les deux méthodes de dragage retenues pour la construction des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin incluent le dragage mécanique et le dragage hydraulique à succion. Dans le cas du dragage mécanique, la séparation des phases est réalisée par sédimentation. Pour ce qui est du dragage hydraulique, un polymère est ajouté aux boues pompées et les boues ainsi polymérisées sont ensuite filtrées à travers un sac filtrant, séparant ainsi les phases liquide et solide.

Les opérations de dragage mécanique et hydraulique des sédiments ont été réalisées dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. L'échantillonnage a donc eu lieu au cours de la réalisation de ce volet à l'été 2011. La figure F-1 illustre le schéma récapitulatif des activités réalisées pour la caractérisation avancée des phases issues du dragage des sédiments du lac Saint-Augustin.

Essentiellement, les éléments métalliques qui ont été caractérisés dans les phases liquide et solide incluent le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc puisqu'il s'agit des quatre métaux lourds retrouvés en plus forte proportion dans les sédiments du lac Saint-Augustin, ce qui en fait des contaminants prioritaires (Brin, 2007 ; Dominguez, 2004). En plus de ces métaux lourds, les phases issues du dragage des sédiments du lac Saint-Augustin ont aussi été caractérisées en phosphore soluble et en phosphore total selon qu'il s'agit de la phase liquide ou de la phase solide. Un test de lixiviation a également été réalisé sur les phases solides issues des deux méthodes de dragage afin d'évaluer la mobilité des espèces inorganiques au sein des sédiments du lac Saint-Augustin. L'annexe F se divise en 4 sections principales : l'échantillonnage des sédiments, la description du protocole suivi

pour la caractérisation des phases issues du dragage, la description des analyses réalisées et des équipements utilisés et enfin les résultats obtenus.

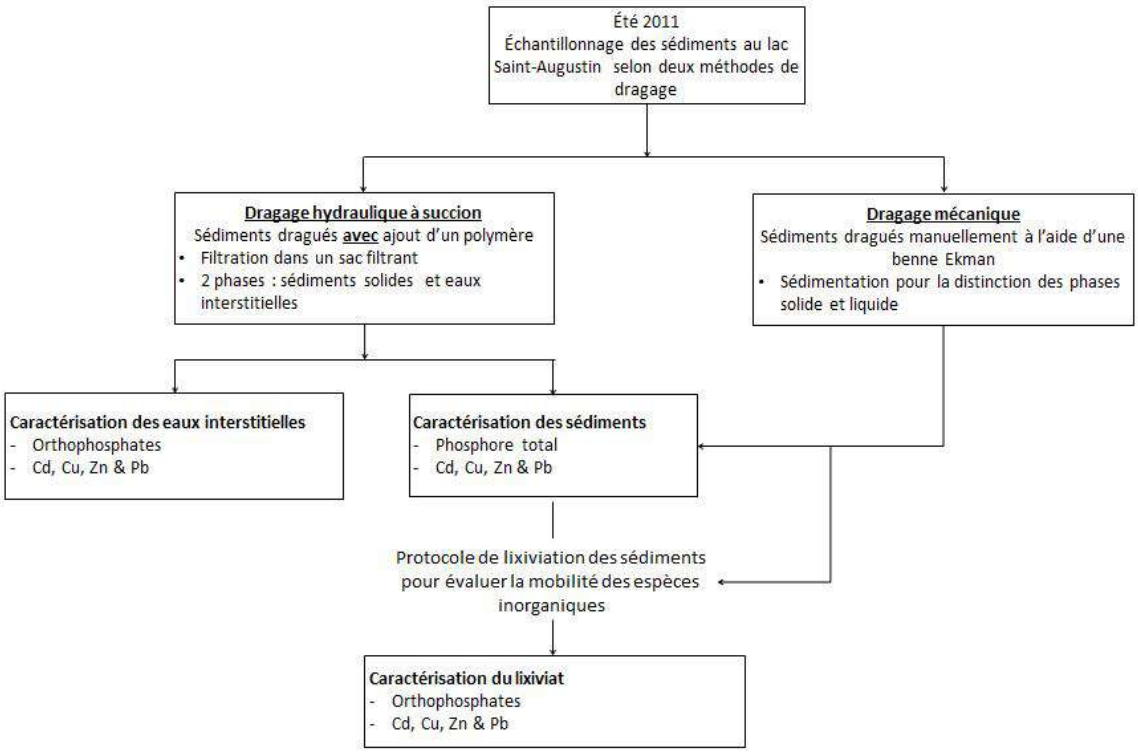


**Figure F - 1 : Schéma récapitulatif des activités réalisées pour la caractérisation avancée des phases issues du dragage des sédiments du lac Saint-Augustin**

## F.1 L'échantillonnage des sédiments

Le volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin a été réalisé au cours de l'été 2011. Dans ce volet, une plate-forme flottante comprenant 4 enclos a été mise en place au lac Saint-Augustin afin de tester *in-situ* les performances respectives du dragage mécanique et du dragage hydraulique à succion en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble dans la colonne d'eau, entre autres. La plate-forme a été positionnée dans la portion nord-est du lac Saint-Augustin dans une zone présentant un haut niveau de contamination des sédiments en phosphore et en métaux lourds. De plus, le choix de ce positionnement pour la plate-forme du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin fait suite aux tests de diffusion réalisés dans le volet 1. En effet, il a été démontré dans le volet 1 que le relargage du phosphore provenant des

sédiments était plus important dans la portion nord-est du lac Saint-Augustin (Constantin et *al.*, 2012 ; Bourget et *al.*, 2010).

La figure F-2 montre une partie de la plate-forme flottante et des enclos qui ont servi pour faire les tests de dragage *in situ* à l'été 2011. La localisation des plates-formes utilisées en 2009 et 2011 au lac Saint-Augustin est également indiquée sur cette figure (Constantin et *al.*, 2012 ; Bourget, 2011).

**Figure F - 2 : Image des enclos (gauche) et positionnement des plates-formes aux étés 2009 et 2011 (droite)**

Le tableau F-1 donne des renseignements concernant les procédés de gestion des sédiments contaminés appliqués *in situ* dans le cadre des volets 1 et 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin réalisés respectivement en 2009 et en 2011.

**Tableau F - 1 : Procédés *in situ* appliqués dans les enclos lors des essais en plate-forme de 2009 et 2011**

| | Volet 1 | Volet 2 |
|---|---|---|
| **Année** | **2009** | **2011** |
| **Enclos 1** | Alun seul | Dragage mécanique |
| **Enclos 2** | Calcaire seul | Dragage hydraulique |
| **Enclos 3** | Alun et calcaire | Alun et calcaire |
| **Enclos 4** | Témoin | Témoin |

### F.1.1 Le dragage mécanique

Deux des quatre enclos de la plate-forme installée en 2011 ont servi pour le dragage mécanique et le dragage hydraulique à succion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin. Dans le cas du dragage mécanique, l'extraction des sédiments s'est fait à l'aide d'une benne Ekman, illustrée à la figure F-3.

**Figure F - 3 : Benne Ekman utilisée pour l'échantillonnage des sédiments au lac Saint-Augustin**

Les sédiments dragués mécaniquement ont été transportés par radeau sur la terre ferme à l'aide de chaudières de 20 L en polyéthylène de haute densité. Ils ont ensuite été transvidés et entreposés temporairement dans des cuves de stockage avant d'être transportés à l'université Laval pour analyses en laboratoire. Les sédiments dragués mécaniquement ont été extraits du lac à la fin juillet 2011.

### F.1.2 Le dragage hydraulique à succion

L'opération de dragage hydraulique des sédiments contaminés à l'échelle pilote au lac Saint-Augustin a été réalisée par le groupe Terratube à la mi-août 2011. Les sédiments ont été pompés directement dans une cuve de stockage et amenés sur la rive où ils ont été entreposés temporairement en attendant l'étape de la polymérisation des boues pompées. La figure F-4 illustre le pompage des sédiments tel qu'il a été réalisé dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. La nature lâche et non-consolidée des sédiments du lac Saint-Augustin est très évidente sur la photo de droite de la figure F-4.

**Figure F - 4 : Pompage des sédiments (gauche) et exutoire du tuyau de pompage (droite)**

Une fois les sédiments extraits par dragage hydraulique, ceux-ci ont été polymérisées afin de grossir la taille des flocs. La dose de polymère identifiée et recommandée par M. Jean-Serge Leblanc de Chemco inc. est de 20 à 25 mL de polymère CMX123 à une concentration de 0,4 % par litre de boues pompées. À titre indicatif, le polymère CMX123 ne contient pas d'aluminium. Une fois les sédiments polymérisés et les flocs bien formés, les phases solide et liquide ont été séparées par filtration à travers un sac filtrant. La polymérisation des sédiments et le sac filtrant utilisé pour filtrer les sédiments polymérisés sont illustrés à la figure F-5. Sur la figure F-5, on peut déjà voir une grande différence entre la taille des flocs après polymérisation des sédiments en comparaison avec la figure F-4, tout juste après l'étape du dragage hydraulique à succion.

**Figure F - 5 : Polymérisation des sédiments (gauche) et sac filtrant (droite)**

## F.2 Protocole de caractérisation des phases issues du dragage

Les opérations de dragage mécanique et de dragage hydraulique à succion entrainent un remaniement important des sédiments contaminés dans la colonne d'eau et les contaminants sont ainsi sujets à migrer d'une phase à l'autre pendant l'extraction. Dépendamment des concentrations en contaminants retrouvées dans une phase ou l'autre, différentes stratégies de gestion sont disponibles et doivent être choisies en conséquence. Il a donc été essentiel de caractériser les sédiments dragués selon les deux méthodes de dragage de même que l'eau interstitielle qui s'écoule à travers le sac filtrant dans le cas du dragage hydraulique.

Suivant la construction des scénarios/sous-scénarios de gestion des sédiments contaminés pour ce projet de maîtrise, les sédiments peuvent être valorisés à l'intérieur comme à l'extérieur du bassin versant. La mobilité des espèces inorganiques d'intérêt (Cd, Cu, Zn et Pb) contenues dans les sédiments a été évaluée en suivant un protocole de lixiviation. Le potentiel toxicologique de ces espèces dans le milieu naturel a ainsi pu être déterminé. Le protocole suivi pour la caractérisation chimique des phases issues du dragage des sédiments contaminés au lac Saint-Augustin est détaillé ci-dessous :

**BUT : Effectuer la caractérisation chimique des phases issues du dragage mécanique et du dragage hydraulique à succion des sédiments du lac Saint-Augustin**

**Objectifs :**

- caractériser les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement en phosphore total et en métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn) ;
- caractériser les eaux interstitielles qui s'écoulent à travers le sac filtrant après le dragage hydraulique en phosphore soluble et en métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn) ;
- déterminer la mobilité des espèces inorganiques en suivant un protocole de lixiviation.

**Dragage mécanique - échantillonnage**

1. Prélever 20 L des sédiments dragués mécaniquement à la fin juillet 2011 dans une chaudière en polyéthylène de haute densité, entreposer à 4 °C et conserver pendant une durée inférieure ou égale à 180 jours ;

**Dragage hydraulique à succion – échantillonnage**

2. Recueillir les sédiments polymérisés et filtrés à l'aide d'un sac filtrant dans une chaudière en polyéthylène de haute densité, entreposer à 4 °C et conserver pendant une durée inférieure ou égale à 180 jours ;
3. Recueillir l'eau de percolation qui s'écoule à travers le sac filtrant dans une chaudière en polyéthylène de haute densité ;
4. Dans un délai de 48 heures après l'échantillonnage, filtrer l'eau échantillonnée à l'étape 3 sur un filtre millipore 0,45 µm et recueillir le filtrat dans des éprouvettes de plastique d'au plus 50 ml. Acidifier à pH < 2 à l'aide d'acide nitrique si les analyses ne sont pas réalisées immédiatement et entreposer à 4 °C (*Standard method # 3030 B.*) ;

**Caractérisation des sédiments post-dragage[24]**

Les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement au cours de l'été 2011 font l'objet d'une caractérisation en métaux lourds et en phosphore total.

5. Caractériser les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement en phosphore total ;
    - *Ces analyses sont réalisées par le Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec (CEAEQ).*
6. Caractériser les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement en cadmium (Cd), en cuivre (Cu), en plomb (Pb) et en zinc (Zn) total à l'aide du spectromètre d'absorption atomique à flamme VARIAN AA240FS (*Standard method #3111*) ;

[24] Analyse réalisée sur deux échantillons par méthode de dragage en duplicata.

**Dragage hydraulique à succion – caractérisation des eaux interstitielles/filtrat post dragage[25]**

7. Mesurer la concentration du filtrat en phosphore dissous (orthophosphates) à l'aide d'une méthode colorimétrique à l'acide ascorbique (*Standard method* #4500-P E.) ;
8. Mesurer la concentration du filtrat en cadmium (Cd), en cuivre (Cu), en plomb (Pb) et en zinc (Zn) total à l'aide du spectromètre d'absorption atomique à flamme VARIAN AA240FS (*Standard method #3111*) ;
9. Comparer les résultats obtenus avec les normes et législations en vigueur afin de déterminer une alternative de disposition des phases conséquente et adaptée ;

**Évaluation de la toxicité par test de lixiviation des sédiments dragués[26]**

10. Déterminer la mobilité des espèces inorganiques d'intérêt dans les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement à l'aide d'un protocole de lixiviation (MA. 100 – Lix.com. 1.0) ;
11. Caractériser le lixiviat en cadmium (Cd), en cuivre (Cu), en plomb (Pb) et en zinc (Zn) total à l'aide du spectromètre d'absorption atomique à flamme VARIAN AA240FS (*Standard method #3111*) ;
12. Caractériser le lixiviat en phosphore dissous (orthophosphates) à l'aide d'une méthode colorimétrique à l'acide ascorbique (*Standard method* #4500-P E.).

Les modalités de prélèvement et de conservation des échantillons sont importantes à respecter et varient d'un contaminant à l'autre. Il faut donc choisir la modalité la plus contraignante lorsque plusieurs contaminants doivent être caractérisés. Dans le cas du phosphore soluble pour les échantillons liquides, la filtration à 0,45 µm et la réfrigération à 4°C doit se faire dans les 48 heures suivant l'échantillonnage (CEAEQ, 2011 ; CEAEQ, 2009 ; American Public Health Association et *al.*, 1999). Par ailleurs, les échantillons liquides doivent également être filtrés et acidifiés à pH < 2 pour le dosage des métaux lourds (CEAEQ, 2009 ; American Public Health Association et *al.*, 1999). Les échantillons solides se conservent pendant 180 jours à 4 °C pour le phosphore total et les métaux lourds

[25] Analyse réalisée en triplicata.
[26] Analyse réalisée sur deux échantillons par méthode de dragage en duplicata.

(MDDEP, 2010). Ces modalités de prélèvement et de conservation ont été respectées dans le protocole détaillé ci-dessus pour chaque contaminant.

## F.3 Les analyses réalisées et les équipements utilisés en laboratoire

Pour tous les types de substrats à analyser (liquides ou solides), les paramètres qui ont été suivis sont essentiellement les mêmes et incluent les concentrations en cadmium, en cuivre, en plomb et en zinc pour le groupe des métaux lourds. La caractérisation en métaux lourds s'est faite à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique à flamme. Plus spécifiquement, le modèle de spectromètre utilisé est le VARIAN AA240FS et est muni d'un échantillonneur automatique VARIAN SPS3. Le protocole suivi pour la caractérisation des sols en métaux lourds est basé sur le protocole maison de l'université Laval (Dubé, s.a.). En complément, le protocole 3111-B *Direct Air-Acetylene Flame Method* a été utilisé pour la caractérisation des échantillons solides et liquides en métaux lourds. La préparation des échantillons a été réalisée à l'aide de la section 3030 – *Preliminary Treatment of Samples* (American Public Health Association et *al.*, 1999). La figure F-6 montre le spectromètre d'absorption atomique à flamme utilisé (gauche) de même que l'échantillonneur automatique (droite) au laboratoire d'environnement de l'université Laval.

**Figure F - 6 : Spectromètre d'absorption atomique à flamme (gauche) et échantillonneur automatique (droite) utilisé pour la caractérisation des échantillons en métaux lourds**

Suivant le protocole décrit à la section F.2, les sédiments contaminés du lac Saint-Augustin ont également été caractérisés en phosphore total. La caractérisation d'échantillons solides en phosphore total nécessite la digestion complète des échantillons et l'utilisation de

réactifs très forts. Pour cette raison et pour des raisons de sécurité, ces analyses n'ont pas été réalisées à l'université Laval. Les échantillons de sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement au lac Saint-Augustin ont donc été envoyés au Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec (CEAEQ) pour une caractérisation en phosphore total.

Le dosage du phosphore soluble a été réalisé à l'aide d'une méthode colorimétrique à l'acide ascorbique. En effet, les orthophosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium en milieu acide. L'acide phosphomolybdique est le produit de cette réaction et réagit avec l'acide ascorbique pour former le bleu de molybdène. L'absorbance mesurée à 880 nm est proportionnelle à la concentration en phosphore dissous retrouvé dans l'échantillon. Cette absorbance se mesure à l'aide d'un spectrophotomètre et les concentrations en phosphore soluble sont retrouvées à l'aide d'une courbe de calibration préalablement déterminée. Les protocoles MA. 303 – P 1.1 et 4500-P E. *Acid Ascorbic Method* ont été utilisés pour quantifier le phosphore soluble présent dans les échantillons liquides (CEAEQ, 2011 ; American Public Health Association et *al.*, 1999). Le spectrophotomètre utilisé est le modèle HACH DR-500 et est montré à la figure F-7.

**Figure F - 7 : Spectrophotomètre utilisé pour la caractérisation des échantillons liquides en phosphore dissous par mesure de l'absorbance à 880 nm**

Le protocole de lixiviation utilisé pour mesurer la mobilité des espèces inorganiques est le MA. 100 – Lix.com. 1.0. Plus connu en anglais sous le nom de *Toxicity Characteristic*

*Leaching Procedure* (TCLP), ce protocole a ici été utilisé afin d'évaluer la toxicité des sédiments selon les deux méthodes de dragage réalisées dans le cadre du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Les résultats de cette expérience ont mené au choix éclairé d'une stratégie de gestion pour les sédiments contaminés du lac Saint-Augustin une fois extraits.

Appliqué au cas du lac Saint-Augustin, le protocole de lixiviation solubilise l'ensemble des métaux lourds pouvant l'être à l'aide d'un lixiviat synthétique. Conformément au protocole de lixiviation, le lixiviat synthétique utilisé est composé de 5,7 ml d'acide acétique et 2,572 g d'hydroxyde de sodium dans un ballon de 1 L d'eau désionisée. Le pH de cette solution est 4.93 ± 0.05. La caractérisation en métaux lourds du lixiviat après la réalisation du protocole TCLP a donné une indication de la toxicité des sédiments du lac Saint-Augustin dans un milieu récepteur (CEAEQ, 2006).

## F.4 Résultats préliminaires de la caractérisation détaillée des phases issues du dragage

### F.4.1 La phase solide

La caractérisation des sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement (après polymérisation) en métaux lourds a été réalisée sur deux échantillons par méthode de dragage et chaque échantillon a été analysé en duplicata. Pour la caractérisation en phosphore total des échantillons solides, un seul échantillon par méthode de dragage a été envoyé au Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec (CEAEQ) pour analyses. Les concentrations moyennes des duplicatas par échantillon et par méthode de dragage sont montrées au tableau F-2.

**Tableau F - 2 : Concentrations en phosphore total et concentrations moyennes des principaux métaux lourds retrouvées dans les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement au lac Saint-Augustin**

| Méthode de dragage | | Concentrations moyennes | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Cu mg/kg | Cd mg/kg | Pb mg/kg | Zn mg/kg | $P_{tot}$ mg/kg |
| Dragage mécanique | Échantillon 1 | 42,05 | 2,58 | 87,00 | 188,57 | 850 |
| | Échantillon 2 | 42,27 | 2,61 | 93,44 | 188,79 | |
| Dragage hydraulique | Échantillon 1 | 41,50 | 2,56 | 75,69 | 159,35 | 820 |
| | Échantillon 2 | 40,60 | 2,48 | 78,88 | 160,65 | |

On remarque au tableau F-2 que les échantillons de sédiments issus du dragage mécanique montrent des concentrations plus élevées en métaux lourds comparativement aux échantillons de dragage hydraulique. Cette affirmation est particulièrement vraie dans le cas du plomb et du zinc comparativement au cuivre et au cadmium. Les ordres de grandeur des résultats obtenus sont également similaires à ceux des études précédentes[27]. Par ailleurs, les concentrations mesurées dans les sédiments dragués hydrauliquement et mécaniquement sont supérieures à la concentration d'effets occasionnels (CEO) pour le plomb, le cadmium et le zinc. En référence aux zones fortement contaminées délimitées à la section 3.1 et à la position de la plate-forme montrée à la figure F-2, ce constat est normal puisque la plateforme flottante de l'été 2011 a été installée au-dessus de l'une des zones à haute contamination du lac Saint-Augustin. Rappelons qu'une zone à haute contamination est définie comme telle lorsque les concentrations retrouvées en métaux lourds sont supérieures à la concentration produisant un effet probable (CEP) qui est par définition supérieure à la CEO. Enfin, les résultats issus de la caractérisation en phosphore total des échantillons solides sont du même ordre de grandeur d'une méthode de dragage à l'autre et sont cohérents avec les niveaux de contamination répertoriés dans les études précédentes au lac Saint-Augustin.

[27] Voir Chapitre 1 – Tableau 6.

### F.4.2 La phase liquide et le test de lixiviation

La mobilité des principales espèces inorganiques retrouvées dans les sédiments du lac Saint-Augustin a été évaluée à l'aide d'un protocole de lixiviation. De la même manière, deux échantillons solides par méthode de dragage ont été analysés, cette fois en triplicata. Les moyennes et les écarts-types par échantillon analysé en triplicata pour chacun des contaminants analysés sont montrés au tableau F-3. Les valeurs moyennes obtenues pour chaque espèce inorganique ont ensuite été comparées aux valeurs seuils proposées dans le Règlement sur les déchets solides.

**Tableau F - 3 : Concentrations moyennes en phosphore soluble et métaux lourds obtenues dans le lixiviat synthétique pour les sédiments dragués mécaniquement et hydrauliquement après TCLP**

| Méthode de dragage | | Concentrations moyennes | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Cu mg/L | Cd mg/L | Pb mg/L | Zn mg/L | P mg/L |
| Dragage mécanique | Échantillon 1 | < LD | < LD | 0,68 ± 0,08 | 0,762 ± 0,004 | < LD |
| | Échantillon 2 | < LD | < LD | 0,71 ± 0,12 | 0,578 ± 0,004 | < LD |
| Dragage hydraulique | Échantillon 1 | < LD | < LD | 0,60 ± 0,14 | 0,737 ± 0,010 | < LD |
| | Échantillon 2 | < LD | < LD | 0,52 ± 0,17 | 0,697 ± 0,003 | < LD |
| Critère (*Règlement sur les déchets solides*) | | 1 | 0,1 | 0,1 | 1 | N/A |

Il ressort du tableau F-3 que le cuivre et le cadmium ne sont pas très mobiles au sein de la matrice de sédiments contaminés, contrairement au plomb et au zinc. Par ailleurs, les concentrations moyennes retrouvées dans le lixiviat synthétique sont inférieures aux seuils définis dans le *Règlement sur les déchets solides*, à l'exception du plomb (Gouvernement du Québec, 2012). Tel que prévu dans ce Règlement et advenant le cas où les sédiments seraient valorisés comme matériau de recouvrement dans un site d'enfouissement sanitaire, une attention particulière devrait être portée au suivi des concentrations en plomb dans le lixiviat généré sur le site d'enfouissement. Par ailleurs, les concentrations mesurées en

phosphore soluble dans le lixiviat synthétique sont sous le seuil de détection de la méthode pour l'ensemble des échantillons analysés.

La phase liquide issue du dragage hydraulique des sédiments du lac Saint-Augustin a également été caractérisée au laboratoire d'environnement de l'université Laval. Les concentrations retrouvées en cadmium, en cuivre, en plomb et en zinc issues de cette caractérisation sont sous la limite de détection respective de chacun de ces métaux. Les concentrations retrouvées en phosphore soluble sont également inférieures à la limite de détection de la méthode qui est de 10 µg/L. De plus, l'enlèvement des particules en suspension entre l'entrée et la sortie du filtre avoisine les 98 % (Constantin et *al.*, 2012). En outre, la phase liquide issue du dragage hydraulique des sédiments du lac Saint-Augustin a aussi été caractérisée de manière plus précise par le Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec (CEAEQ). Les principaux résultats issus de cette caractérisation sont résumés au tableau F-4.

**Tableau F - 4 : Résultats de caractérisation des eaux issues du dragage hydraulique obtenus par le CEAEQ et comparaison avec les critères pour la prévention de la contamination****

| Métal | Résultat | Critère pour la prévention de la contamination (eau + organismes aquatiques) | Critère pour la prévention de la contamination (organismes aquatiques seulement) | Unité |
|---|---|---|---|---|
| **Aluminium** | 0,011 | 0,1 | - | mg/L |
| **Fer** | 1,4 | 0,3 | - | mg/L |
| **Cadmium** | 0,092 | 0,005 | 0,13 | mg/L |
| **Cuivre** | 0,008 | 1 | 38 | mg/L |
| **Plomb** | <0,004 | 0,01 | 0,19 | mg/L |
| **Zinc** | 0,033 | 5 | 26 | mg/L |

** Les critères pour la prévention de la contamination sont tirés du guide Critères de qualité de l'eau de surface du MDDEP (MDDEP, 2012).

On remarque au tableau F-4 que le fer et le cadmium affichent des concentrations qui excèdent le critère pour la prévention de la contamination (eau + organismes aquatiques) sans toutefois dépasser le critère pour la prévention de la contamination (organismes aquatiques seulement). Dans le cas du cadmium, la valeur seuil de 0,005 mg/L correspond à la concentration maximale acceptable pour l'eau potable. Quant au fer, un dépassement de la valeur 0,3 mg/L peut entraîner une altération des propriétés organoleptiques ou

esthétique de l'eau pour la consommation humaine. Comme l'eau du lac Saint-Augustin n'est pas vouée à la consommation humaine, le dépassement des concentrations retrouvées en fer et en cadmium en comparaison avec le critère pour la prévention de la contamination (eau + organismes aquatiques) n'est pas dramatique. En conséquence, les eaux issues du dragage hydraulique des sédiments avec polymérisation et filtration des boues pompées pourraient donc être retournées directement au lac Saint-Augustin sans traitement supplémentaire.

Enfin, la phase liquide obtenue suite à la décantation des sédiments dragués mécaniquement n'a pas été caractérisée dans le protocole présenté ci-dessus. En fait, le choix de ce mode de séparation des phases pour la construction des scénarios/sous-scénarios incluant le dragage mécanique comme procédé de gestion des sédiments contaminés (A1 et C2) a été réalisé tardivement. Heureusement, les phases issues de la décantation des sédiments dragués mécaniquement ont été caractérisées dans le rapport technique préliminaire du volet 2 du projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin (Constantin et *al.*, 2012) et les principaux résultats obtenus ont été repris dans le corps du texte.

# Annexe G Exemples de calculs

Les calculs qui suivent sont valides pour les données techniques et économiques figurant dans les tableaux 19, 22, 24 et 25 du chapitre 4.

## G.1 Caractéristiques techniques des sous-scénarios (tableau 19)

**Exemple – Volume des sédiments à draguer : scénario A1**

$$Superficie \text{ à } draguer = Zone\ 1 + Zone\ 3 + Zone\ 4^{28}$$
$$Superficie \text{ à } draguer = 108\,680 m^2 + 122\,850 m^2 + 106\,600 m^2 = 338\,130 m^2$$
$$Volume \text{ à } draguer = Superficie \text{ à } draguer \times épaisseur\ de\ sédiments \text{ à } draguer$$
$$Volume \text{ à } draguer = 338\,130\ m^2 \times 0{,}30 m = 101\,439 m^3$$

**Exemple – Nombre de voyages par camion requis pour disposer des sédiments dragués : scénario C1**

Pour draguer 736 379 m de sédiments contaminés au lac Saint-Augustin, 700 voyages en fardier de 50 tonnes sont requis (Ville de Québec, 2009). Le volume à disposer pour le scénario C1 est 101439m.

$$Nombre\ de\ voyages\ pour\ C1 = 101439 m^3 \times \frac{700\ voyages}{736\,379\ m^3} = 97\ voyages$$

**Exemple – Durée des travaux de dragage mécanique : scénario A1**

En considérant un volume d'extraction journalier de 800 cy = 611,64 m (USEPA, 2010) :

$$Durée = 101\,439 m^3 \times \frac{1j}{611.64 m^3} = 166\ jours$$

**Exemple – Volume de pierre calcaire et/ou sable : scénario A1**

$$Volume\ requis = superficie \text{ à } couvrir\ (Zone\ 2) \times épaisseur\ requise$$
$$Volume\ requis = 160\ 290 m^2 \times 0{,}10\ m = 16029\ m^3$$

[28] Les superficies corrigées sont utilisées pour tenir compte de la bathymétrie au lac Saint-Augustin.

**Exemple – Durée des travaux d'application du recouvrement actif : sous-scénario A1**

En considérant un débit d'application journalier de 800 cy = 612 m³ (USEPA, 2010) :

$$Durée = \frac{(Volume\ calcaire + Volume\ sable)}{Débit\ d'application journalier}$$

$$Durée = \frac{16029m^3 + 16029m^3}{612\ {}^{m^3}/_{j}} = 53\ jours$$

**Exemple 1 – Durée totale des travaux de mise en place des solutions : sous-scénario A1**

Pour les sous-scénarios A1 et A2, l'étape de la mise en place du matériau de recouvrement ne peut être complétée avant que le dragage des zones I, III et IV ne soit complété. La durée totale des travaux se calcule donc comme suit :

$$Durée\ totale = Durée\ dragage + Durée\ de\ la\ mise\ en\ place\ du\ recouvrement$$

$$Durée\ totale = 166\ jours + 53\ jours = 219\ jours$$

**Exemple 2 – Durée totale des travaux de mise en place des solutions : sous-scénario C1**

Pour les sous-scénarios B1, B2, C1 et C2, les opérations de dragage et de mise en place du matériau de recouvrement peuvent se réaliser simultanément. La durée totale des travaux se calcule comme suit :

$$Durée\ totale = \max(Durée\ dragage, Durée\ de\ la\ mise\ en\ place\ du\ recouvrement)$$

$$Durée\ totale = \max(160\ jours, 53\ jours) = 160\ jours$$

**Exemple – Durabilité de la solution : recouvrement actif des sédiments contaminés**

Le matériau de recouvrement utilisé est la pierre calcaire (1500 kg/m³). Dans le cas de ce matériau, en considérant un potentiel d'absorption de 70 mg P/kg de pierre (Parant, 2007) et un relargage moyen annuel de 357,8 mg P/m² au lac Saint-Augustin, la durabilité se calcule comme suit :

$$Durabilité = \frac{volume\ de\ pierre\ \times masse\ volumique\ pierre \times potentiel\ d'absorption}{Relargage\ annuel\ moyen}$$

$$Durabilité = \frac{1m^2 \times 0{,}1m \times 1500\ {}^{kg}/_{m^3} \times 70\ {}^{mg\ P}/_{kg}}{357{,}8\ {}^{mg\ P}/_{an}} = 30\ ans$$

## G.2 Évaluation économique de l'investissement initial du projet (tableau 22)

**Exemple – Frais requis pour la main-d'œuvre : scénario A2**

Le coût de la main-d'œuvre pour le dragage hydraulique est estimé à 2420$/quart de travail pour 4 personnes. En assumant 1 quart de travail par jour, on obtient :

$$Coût\ de\ main - d'oeuvre = \frac{2420\$}{quart\ de\ travail} \times \frac{1\ quart\ de\ travail}{jour} \times 160\ jours = 387200\$$$

**Exemple – Coûts de transport après séparation des phases solide-liquide : scénario B2**

Le transport de 700 000m³ de sédiments dragués vers un site de déposition final à 25km du point d'extraction coûte 1 050 000$. Un total de 149 526 m³ de sédiments dragués est à transporter pour le scénario B2 (Ville de Québec, 2009).

$$Coût\ de\ transport = 149\ 526m^3 \times \frac{1\ 050\ 000\$}{700\ 000m^3} \approx 225\ 000\$$$

**Exemple – Coûts associés au dragage mécanique : scénario A1**

Le coût retenu pour les opérations de dragage mécanique des sédiments est de 15€/m³ (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). En considérant un taux de change moyen de 1,39$/€ en 2011 :

$$Coûts\ dragage\ mécanique = 15\ {}^{€}/_{m^3} \times 101439m^3 \times 1{,}39\ {}^{\$}/_{€} = 2\ 115\ 000\$$$

**Exemple – Coûts associés à l'alun : scénario A1**

Il en coûte 0,30$/m² pour appliquer l'alun dans une colonne d'eau de manière à obtenir une concentration de 20 – 30 mg/L (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Dans le scénario A1,

seule la zone II fait l'objet d'un traitement à l'alun. Ici, la superficie orthogonale est préférée à la superficie corrigée qui prend en compte la bathymétrie du lac Saint-Augustin.

$$Coûts\ pour\ l'alun = \frac{0{,}30\$}{m^2} \times 123\ 300 m^2 = 36\ 990\$$$

**Exemple – Coûts en sable : scénario A1**

$$Coûts\ pour\ le\ sable = volume\ de\ sable \times masse\ volumique \times coût\ à\ la\ tonne$$

$$Coûts\ pour\ le\ sable = 16\ 029 m^3 \times \frac{1850 kg}{m^3} \times \frac{1\ tonne}{1000 kg} \times \frac{9{,}50\$}{tonne} = 281\ 713\$$$

Le même exemple s'applique pour le coût associé à la pierre calcaire et à son transport.

**Exemple – Coûts associé à la mise en place du matériau de recouvrement : scénario A1**

En considérant un débit d'application journalier de 800 cy = 612 m³ et des frais journalier de 14 200$ (USEPA, 2010) :

$$Coût\ pour\ la\ mise\ en\ place = \frac{(Volume\ calcaire + Volume\ sable)}{612\ {}^{m^3}/_{j}} \times 14200\ {}^{\$}/_{j}$$

$$Coût\ pour\ la\ m\ ise\ en\ place = \frac{(16029 m^3 + 16029 m^3)}{612\ {}^{m^3}/_{j}} \times 14200\ {}^{\$}/_{j} = 746\ 120\$$$

## G.3 Évaluation économique des mesures d'atténuation (tableau 24)

**Exemple – Coûts associés à la mise en place de rideaux de turbidité : sous-scénario C2**

Ici, l'incrément i correspond au numéro de la zone où il y a mise en place de cette mesure d'atténuation.

$$Coûts\ rideaux = \sum_{i=1}^{4} Nombre\ de\ rideaux\ requis_i \times Coût\ unitaire\ par\ rideaux$$

$$Coûts\ rideaux = \left[\left(20\ rid. \times 450\ {}^{\$}/_{rid.}\right) + \left(25\ rid. \times 600\ {}^{\$}/_{rid.}\right)\right] + \left(49\ rid. \times 715\ {}^{\$}/_{rid.}\right) + \left(45\ rid. \times 715\ {}^{\$}/_{rid.}\right) = 91\ 210\$$$

## G.4 Évaluation économique de la disposition/valorisation des sédiments (tableau 25)

**Exemple – Coûts associés à la disposition terrestre des sédiments après dragage : scénario B2**

Les sédiments peuvent être utilisés comme matériau de remblaiement à raison de 7,63€/m³ (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004) qu'on peut convertir en $ canadien en prenant un taux de conversion de 1,39.

$$Matériel\ de\ remblai = \frac{7{,}63€}{m^3} \times 149\ 526m^3 \times \frac{1{,}39\$}{€} = 1\ 585\ 828\$$$

**Exemple – Coûts associés à la réinsertion *in-situ* des sédiments après dragage : scénario A1**

Les sédiments peuvent être réinsérés au milieu récepteur à raison de 4.58€/m³ (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004) qu'on peut convertir en $ canadien en prenant un taux de conversion conservateur de 1,39.

$$Réinsertion = \frac{4{,}58€}{m^3} \times 101439m^3 \times \frac{1{,}39\$}{€} = 645\ 781\$$$

**Exemple – Actualisation (4,44%) du coût (5 $ US) de réinsertion des sédiments en mer pour la région de New York et du New Jersey en 1991 en assumant la parité entre les dollars canadiens et américains.**

$$MA_{1991-2011} = 5\ \$\ US \times (1 + 0{,}0444)^{20} = 11{,}92\ \$$$

# Annexe H Matrices de comparaison des niveaux définis pour l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères

Afin de pouvoir utiliser la méthode hiérarchique multicritères, les composantes des différents niveaux de la hiérarchie doivent d'abord être comparées par paires au respect du tableau 11 présenté dans la section 2.5.4. Cette annexe présente les matrices de comparaison utilisées pour le calcul des poids des constituants de chacun des niveaux définis pour l'utilisation de la méthode hiérarchique multicritères au lac Saint-Augustin et se divise en trois sections. Les matrices de comparaison des critères pour chacune des situations de l'analyse de sensibilité sont d'abord présentées. Viennent ensuite les matrices de comparaison des sous-critères de même que les matrices de comparaison des performances des sous-scénarios à l'égard de chaque sous-critère.

## H.1 Matrices de comparaison des critères pour chacune des situations de l'analyse de sensibilité.

Une analyse de sensibilité est réalisée au niveau des critères de la décision pour la méthode hiérarchique multicritères. Les tableaux H-1 à H-4 présentent les matrices de comparaison pour chacune des situations de l'analyse de sensibilité. Ce sont ces matrices qui sont utilisées pour la détermination des poids alloués aux critères pour chacune de ces situations. Les poids calculés à l'aide des matrices de comparaison des critères sont indiqués dans la colonne « poids par critère » et ont été obtenus suivant la méthodologie présentée à la figure 19 de la section 2.5.4. Enfin, les situations à représenter à travers une analyse de sensibilité sur les critères ont été présentées au tableau 16 de la section 3.4.2.

**Tableau H - 1 : Matrice de comparaison des critères pour la situation I – L'égalité des poids des critères**

| Critères | Économique | Technique | Social | Environnemental | Poids par critère |
|---|---|---|---|---|---|
| **Économique** | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | **0,25** |
| **Technique** | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | **0,25** |
| **Social** | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | **0,25** |
| **Environnemental** | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | **0,25** |

**Tableau H - 2 : Matrice de comparaison des critères pour la situation II - L'approche traditionnelle**

| Critères | Économique | Technique | Social | Environnemental | Poids par critère |
|---|---|---|---|---|---|
| **Économique** | 1,00 | 1,00 | 5,00 | 5,00 | **0,42** |
| **Technique** | 1,00 | 1,00 | 5,00 | 5,00 | **0,42** |
| **Social** | 0,20 | 0,20 | 1,00 | 1,00 | **0,08** |
| **Environnemental** | 0,20 | 0,20 | 1,00 | 1,00 | **0,08** |

**Tableau H - 3 : Matrice de comparaison des critères pour la situation III – L'approche progressiste-écologique**

| Critères | Économique | Technique | Social | Environnemental | Poids par critère |
|---|---|---|---|---|---|
| **Économique** | 1,00 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | **0,08** |
| **Technique** | 1,00 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | **0,08** |
| **Social** | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 1,00 | **0,42** |
| **Environnemental** | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 1,00 | **0,42** |

**Tableau H - 4 : Matrice de comparaison des critères pour la situation IV - Le gain de capital politique**

| Critères | Économique | Technique | Social | Environnemental | Poids par critère |
|---|---|---|---|---|---|
| **Économique** | 1,00 | 0,33 | 0,33 | 1,67 | **0,13** |
| **Technique** | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 5,00 | **0,39** |
| **Social** | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 5,00 | **0,39** |
| **Environnemental** | 0,60 | 0,20 | 0,20 | 1,00 | **0,08** |

## H.2 Matrices de comparaison des sous-critères

Une liste de sous-critères a été définie pour chacun des critères de la décision. Les importances relatives des sous-critères au sein de leur critère d'attache ont été présentées au tableau 17 de la section 3.4.2. Ces importances relatives ont été adaptées au respect de l'échelle sémantique de Saaty (tableau 11) afin de pouvoir développer les matrices de comparaison à utiliser pour la méthode hiérarchique multicritères. Les tableaux H-5 à H-8 présentent les matrices de comparaison pour les sous-critères économiques, techniques, environnementaux et sociaux. Ce sont ces matrices qui sont utilisées pour la détermination des poids alloués aux sous-critères au sein de chacun de leur critère d'attache. Les poids calculés à l'aide des matrices de comparaison des sous-critères sont indiqués dans la colonne « poids par sous-critère » et ont été obtenus suivant la méthodologie présentée à la figure 19 de la section 2.5.4.

**Tableau H - 5 : Matrice de comparaison des sous-critères ÉCONOMIQUES**

| Sous-critères économiques | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Poids par sous-critère |
|---|---|---|---|---|---|
| **Investissement initial du projet** | 1,00 | 5,00 | 7,00 | 3,00 | **0,597** |
| **Coût d'entretien et de suivi** | 0,20 | 1,00 | 1,40 | 0,60 | **0,119** |
| **Disponibilité des matériaux et équipements** | 0,143 | 0,714 | 1,00 | 0,429 | **0,085** |
| **Disposition et valorisation des résidus (sédiments)** | 0,333 | 1,667 | 2,333 | 1,00 | **0,199** |

**Tableau H - 6 : Matrice de comparaison des sous-critères TECHNIQUES**

| Sous-critères techniques | Durabilité de la solution | Performance de la solution - enlèvement des contaminants | Turbidité de l'eau et potentiel de relargage | Faisabilité de la solution | Flexibilité de la solution | Poids par sous-critère |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Durabilité de la solution** | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 5,00 | 7,00 | **0,374** |
| **Performance de la solution - enlèvement des contaminants** | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 5,00 | 7,00 | **0,374** |
| **Turbidité de l'eau et potentiel de relargage** | 0,333 | 0,333 | 1,00 | 1,667 | 2,333 | **0,125** |
| **Faisabilité de la solution** | 0,20 | 0,20 | 0,60 | 1,00 | 1,40 | **0,075** |
| **Flexibilité de la solution** | 0,143 | 0,143 | 0,429 | 0,714 | 1,00 | **0,053** |

**Tableau H - 7 : Matrice de comparaison des sous-critères SOCIAUX**

| Sous-critères sociaux | Nuisances subies par les travailleurs et riverains | Acceptation du projet par le public | Accessibilité financière du projet par les contribuables | Gain social et restauration des usages du lac | Intégration à la communauté de façon structurante | Poids par sous-critère |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nuisances subies par les travailleurs et riverains** | 1,00 | 0,20 | 0,60 | 0,20 | 1,40 | **0,075** |
| **Acceptation du projet par le public** | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 7,00 | **0,374** |
| **Accessibilité financière du projet par les contribuables** | 1,667 | 0,333 | 1,00 | 0,333 | 2,333 | **0,125** |
| **Gain social et restauration des usages du lac** | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 7,00 | **0,374** |
| **Intégration à la communauté de façon structurante** | 0,714 | 0,143 | 0,429 | 0,143 | 1,00 | **0,053** |

**Tableau H - 8 : Matrice de comparaison des sous-critères ENVIRONNEMENTAUX**

| Sous-critères environnementaux | Récupération des sédiments et/ou des matériaux | Gestion éco-responsable des contaminants | Qualité de l'eau et de l'air | Récupération de l'écosystème après implantation de la solution | Poids par sous-critère |
|---|---|---|---|---|---|
| **Récupération des sédiments et/ou des matériaux** | 1,00 | 0,60 | 0,60 | 0,20 | **0,107** |
| **Gestion éco-responsable des contaminants** | 1,667 | 1,00 | 1,00 | 0,333 | **0,179** |
| **Qualité de l'eau et de l'air** | 1,667 | 1,00 | 1,00 | 0,333 | **0,179** |
| **Récupération de l'écosystème après implantation de la solution** | 5,00 | 3,00 | 3,00 | 1,00 | **0,536** |

## H.3 Matrices de comparaison des performances des sous-scénarios en fonction des sous-critères

Enfin, les sous-scénarios proposés pour la gestion des sédiments contaminés du lac Saint-Augustin ont été évalués au respect d'un barème d'évaluation défini pour chacun des sous-critères au tableau 29 de la section 4.3. Le résultat de cette évaluation a ensuite été adapté au respect de l'échelle sémantique de Saaty (tableau 11) afin de pouvoir développer les matrices de comparaison à utiliser pour dériver les poids de performance de chacun des sous-scénarios face à chacun des sous-critères. Les tableaux H-9 à H-26 présentent les matrices de comparaison des sous-scénarios selon chacun des sous-critères définis à la section 3.3. Encore une fois, ce sont ces matrices qui sont utilisées pour la détermination des poids de performance alloués à chacun des sous-scénarios pour chacun des sous-critères. Les poids calculés à l'aide des matrices de comparaison des performances des sous-scénarios en fonction des sous-critères sont indiqués dans la colonne « poids par sous-scénario » et ont été obtenus suivant la méthodologie présentée à la figure 19 de la section 2.5.4.

### H.3.1 Les sous-critères économiques

**Tableau H - 9 : Matrice de comparaison – Investissement initial du projet**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | **0.098** |
| **A2** | 3.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | **0.294** |
| **B1** | 0.600 | 0.200 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 0.200 | **0.059** |
| **B2** | 1.000 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | **0.098** |
| **C1** | 0.600 | 0.200 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 0.200 | **0.059** |
| **C2** | 1.000 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | **0.098** |
| **D** | 3.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | **0.294** |

**Tableau H - 10 : Matrice de comparaison – Coût d'entretien et de suivi**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.400 | **0.115** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.400 | **0.115** |
| **B1** | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.400 | **0.115** |
| **B2** | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | **0.191** |
| **C1** | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | **0.191** |
| **C2** | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | **0.191** |
| **D** | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.429 | 0.429 | 0.429 | 1.000 | **0.082** |

**Tableau H - 11 : Matrice de comparaison – Disponibilité des matériaux et des équipements**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | **0.205** |
| **A2** | 0.333 | 1.000 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | **0.068** |
| **B1** | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | **0.205** |
| **B2** | 0.200 | 0.600 | 0.200 | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | **0.041** |
| **C1** | 0.333 | 1.000 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | **0.068** |
| **C2** | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | **0.205** |
| **D** | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | **0.205** |

**Tableau H - 12 : Matrice de comparaison – Disposition et valorisation des résidus (sédiments)**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 0.333 | 2.333 | 1.667 | 1.667 | 0.333 | **0.104** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 0.333 | 2.333 | 1.667 | 1.667 | 0.333 | **0.104** |
| **B1** | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 7.000 | 5.000 | 5.000 | 1.000 | **0.312** |
| **B2** | 0.429 | 0.429 | 0.143 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.143 | **0.045** |
| **C1** | 0.600 | 0.600 | 0.200 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.200 | **0.062** |
| **C2** | 0.600 | 0.600 | 0.200 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.200 | **0.062** |
| **D** | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 7.000 | 5.000 | 5.000 | 1.000 | **0.312** |

### H.3.2 Les sous-critères techniques

**Tableau H - 13 : Matrice de comparaison – Durabilité de la solution**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **B1** | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | **0.073** |
| **B2** | 3.000 | 3.000 | 5.000 | 1.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | **0.366** |
| **C1** | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **C2** | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **D** | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | **0.073** |

**Tableau H - 14 : Matrice de comparaison – Performance de la solution/enlèvement des contaminants**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.400 | **0.052** |
| **A2** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.667 | 2.333 | **0.086** |
| **B1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 7.000 | **0.258** |
| **B2** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 7.000 | **0.258** |
| **C1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 7.000 | **0.258** |
| **C2** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.400 | **0.052** |
| **D** | 0.714 | 0.429 | 0.143 | 0.143 | 0.143 | 0.714 | 1.000 | **0.037** |

**Tableau H - 15 : Matrice de comparaison – Turbidité de l'eau et potentiel de relargage**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.081** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.081** |
| **B1** | 5.000 | 5.000 | 1.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | 5.000 | **0.405** |
| **B2** | 1.667 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 | **0.135** |
| **C1** | 1.667 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 | **0.135** |
| **C2** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.081** |
| **D** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.081** |

**Tableau H - 16 : Matrice de comparaison – Faisabilité de la solution**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.714 | 0.429 | 0.143 | 0.429 | 0.714 | 0.143 | **0.045** |
| **A2** | 1.400 | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.600 | 1.000 | 0.200 | **0.062** |
| **B1** | 2.333 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 1.000 | 1.667 | 0.333 | **0.104** |
| **B2** | 7.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 3.000 | 5.000 | 1.000 | **0.312** |
| **C1** | 2.333 | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 1.000 | 1.667 | 0.333 | **0.104** |
| **C2** | 1.400 | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.600 | 1.000 | 0.200 | **0.062** |
| **D** | 7.000 | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 3.000 | 5.000 | 1.000 | **0.312** |

**Tableau H - 17 : Matrice de comparaison – Flexibilité de la solution**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.400 | **0.083** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.400 | **0.083** |
| **B1** | 5.000 | 5.000 | 1.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | 7.000 | **0.415** |
| **B2** | 1.667 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 2.333 | **0.138** |
| **C1** | 1.667 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 2.333 | **0.138** |
| **C2** | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.400 | **0.083** |
| **D** | 0.714 | 0.714 | 0.143 | 0.429 | 0.429 | 0.714 | 1.000 | **0.059** |

### H.3.3 Les sous-critères sociaux

**Tableau H - 18 : Matrice de comparaison – Nuisances subies par les travailleurs et les riverains**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.143 | 0.429 | 1.000 | 0.143 | **0.048** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.143 | 0.429 | 1.000 | 0.143 | **0.048** |
| **B1** | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 0.200 | 0.600 | 1.400 | 0.200 | **0.068** |
| **B2** | 7.000 | 7.000 | 5.000 | 1.000 | 3.000 | 7.000 | 1.000 | **0.338** |
| **C1** | 2.333 | 2.333 | 1.667 | 0.333 | 1.000 | 2.333 | 0.333 | **0.113** |
| **C2** | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.143 | 0.429 | 1.000 | 0.143 | **0.048** |
| **D** | 7.000 | 7.000 | 5.000 | 1.000 | 3.000 | 7.000 | 1.000 | **0.338** |

**Tableau H - 19 : Matrice de comparaison – Acceptation du projet par le public**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.000 | **0.051** |
| **A2** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.667 | 1.667 | **0.085** |
| **B1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 5.000 | **0.254** |
| **B2** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 5.000 | **0.254** |
| **C1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 5.000 | **0.254** |
| **C2** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.000 | **0.051** |
| **D** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.000 | **0.051** |

**Tableau H - 20 : Matrice de comparaison – Accessibilité financière du projet par les contribuables**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.200 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.061** |
| **A2** | 5.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | 5.000 | **0.306** |
| **B1** | 5.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | 5.000 | **0.306** |
| **B2** | 1.667 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 | **0.102** |
| **C1** | 1.667 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 | **0.102** |
| **C2** | 1.000 | 0.200 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.061** |
| **D** | 1.000 | 0.200 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | **0.061** |

**Tableau H - 21 : Matrice de comparaison – Gain social et restauration des usages du lac**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.400 | **0.052** |
| **A2** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.667 | 2.333 | **0.086** |
| **B1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 7.000 | **0.258** |
| **B2** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 7.000 | **0.258** |
| **C1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 7.000 | **0.258** |
| **C2** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 1.400 | **0.052** |
| **D** | 0.714 | 0.429 | 0.143 | 0.143 | 0.143 | 0.714 | 1.000 | **0.037** |

**Tableau H - 22 : Matrice de comparaison – Intégration à la communauté de façon structurante**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.667 | **0.068** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.667 | **0.068** |
| **B1** | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | **0.205** |
| **B2** | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | **0.205** |
| **C1** | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | **0.205** |
| **C2** | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5.000 | **0.205** |
| **D** | 0.600 | 0.600 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 1.000 | **0.041** |

### H.3.3 Les sous-critères environnementaux

**Tableau H - 23 : Matrice de comparaison – Récupération des sédiments et/ou des matériaux**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | **0.294** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | **0.294** |
| **B1** | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | **0.059** |
| **B2** | 0.333 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.098** |
| **C1** | 0.333 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.098** |
| **C2** | 0.333 | 0.333 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.098** |
| **D** | 0.200 | 0.200 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | **0.059** |

**Tableau H - 24 : Matrice de comparaison – Gestion éco-responsable des contaminants**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | **0.073** |
| **A2** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **B1** | 5.000 | 3.000 | 1.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 5.000 | **0.366** |
| **B2** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **C1** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **C2** | 1.667 | 1.000 | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | **0.122** |
| **D** | 1.000 | 0.600 | 0.200 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | **0.073** |

**Tableau H - 25 : Matrice de comparaison – Qualité de l'eau et de l'air**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | **0.135** |
| **A2** | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | **0.135** |
| **B1** | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 2.333 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | **0.226** |
| **B2** | 0.714 | 0.714 | 0.429 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | **0.097** |
| **C1** | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | **0.135** |
| **C2** | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | **0.135** |
| **D** | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | **0.135** |

**Tableau H - 26 : Matrice de comparaison – Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution**

| Sous-scénarios | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Poids par sous-scénario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A1** | 1.000 | 0.714 | 0.429 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | **0.105** |
| **A2** | 1.400 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | **0.147** |
| **B1** | 2.333 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 2.333 | 2.333 | **0.245** |
| **B2** | 1.400 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | **0.147** |
| **C1** | 1.400 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | **0.147** |
| **C2** | 1.000 | 0.714 | 0.429 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | **0.105** |
| **D** | 1.000 | 0.714 | 0.429 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | **0.105** |

# Annexe I Tableaux de calcul du vecteur de priorité globale pour les situations I à IV

**Tableau I - 1 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation I (L'égalité des poids des critères) : Écon. = Tech. = Env. = Soc.**

| | **CRITÈRES** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Économique** | | | | **Technique** | | | | | **Social** | | | | | **Environnemental** | | | |
| | 0,25 | | | | 0,25 | | | | | 0,25 | | | | | 0,25 | | | |
| | **SOUS-CRITÈRES** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et des équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Durabilité de la solution | Performance de la solution - enlèvement des contaminants | Turbidité de l'eau et potentiel de relargage | Faisabilité de la solution | Flexibilité de la solution | Nuisances subies par les travailleurs et riverains | Acceptation du projet par le public | Accessibilité financière du projet par les contribuables | Gain social et restauration des usages du lac | Intégration à la communauté de façon structurante | Récupération des sédiments et/ou des matériaux | Gestion éco-responsable des contaminants | Qualité de l'eau et de l'air | Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution | **Vecteur de priorité global des sous-scénarios** |
| | 0,597 | 0,119 | 0,085 | 0,199 | 0,374 | 0,374 | 0,125 | 0,075 | 0,053 | 0,075 | 0,374 | 0,125 | 0,374 | 0,053 | 0,107 | 0,179 | 0,179 | 0,536 | |
| | **SOUS-SCÉNARIOS** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **A1** | 0,098 | 0,115 | 0,205 | 0,104 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,045 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,068 | 0,294 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,093** |
| **A2** | 0,294 | 0,115 | 0,068 | 0,104 | 0,122 | 0,086 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,085 | 0,306 | 0,086 | 0,068 | 0,294 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,144** |
| **B1** | 0,059 | 0,115 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,258 | 0,405 | 0,104 | 0,415 | 0,068 | 0,254 | 0,306 | 0,258 | 0,205 | 0,059 | 0,366 | 0,226 | 0,245 | **0,205** |
| **B2** | 0,098 | 0,191 | 0,041 | 0,045 | 0,366 | 0,258 | 0,135 | 0,312 | 0,138 | 0,338 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,097 | 0,147 | **0,186** |
| **C1** | 0,059 | 0,191 | 0,068 | 0,062 | 0,122 | 0,258 | 0,135 | 0,104 | 0,138 | 0,113 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,152** |
| **C2** | 0,098 | 0,191 | 0,205 | 0,062 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,105 | **0,092** |
| **D** | 0,294 | 0,082 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,037 | 0,081 | 0,312 | 0,059 | 0,338 | 0,051 | 0,061 | 0,037 | 0,041 | 0,059 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,127** |

**Tableau I - 2 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation II (L'approche traditionnelle) : [Écon. = Tech.] > [Env. = Soc.]**

| | **CRITÈRES** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Économique** | | | | **Technique** | | | | | **Social** | | | | | **Environnemental** | | | | |
| | 0,42 | | | | 0,42 | | | | | 0,08 | | | | | 0,08 | | | | |
| | **SOUS-CRITÈRES** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et des équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Durabilité de la solution | Performance de la solution - enlèvement des contaminants | Turbidité de l'eau et potentiel de relargage | Faisabilité de la solution | Flexibilité de la solution | Nuisances subies par les travailleurs et riverains | Acceptation du projet par le public | Accessibilité financière du projet par les contribuables | Gain social et restauration des usages du lac | Intégration à la communauté de façon structurante | Récupération des sédiments et/ou des matériaux | Gestion éco-responsable des contaminants | Qualité de l'eau et de l'air | Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution | **Vecteur de priorité global des sous-scénarios** |
| | 0,597 | 0,119 | 0,085 | 0,199 | 0,374 | 0,374 | 0,125 | 0,075 | 0,053 | 0,075 | 0,374 | 0,125 | 0,374 | 0,053 | 0,107 | 0,179 | 0,179 | 0,536 | |
| | **SOUS-SCÉNARIOS** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **A1** | 0,098 | 0,115 | 0,205 | 0,104 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,045 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,068 | 0,294 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,095** |
| **A2** | 0,294 | 0,115 | 0,068 | 0,104 | 0,122 | 0,086 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,085 | 0,306 | 0,086 | 0,068 | 0,294 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,152** |
| **B1** | 0,059 | 0,115 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,258 | 0,405 | 0,104 | 0,415 | 0,068 | 0,254 | 0,306 | 0,258 | 0,205 | 0,059 | 0,366 | 0,226 | 0,245 | **0,179** |
| **B2** | 0,098 | 0,191 | 0,041 | 0,045 | 0,366 | 0,258 | 0,135 | 0,312 | 0,138 | 0,338 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,097 | 0,147 | **0,187** |
| **C1** | 0,059 | 0,191 | 0,068 | 0,062 | 0,122 | 0,258 | 0,135 | 0,104 | 0,138 | 0,113 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,134** |
| **C2** | 0,098 | 0,191 | 0,205 | 0,062 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,105 | **0,096** |
| **D** | 0,294 | 0,082 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,037 | 0,081 | 0,312 | 0,059 | 0,338 | 0,051 | 0,061 | 0,037 | 0,041 | 0,059 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,157** |

**Tableau I - 3 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation III (L'approche progressiste-écologique) : [Env. = Soc.] > [Écon. = Tech.]**

| | **CRITÈRES** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Économique** | | | | **Technique** | | | | | **Social** | | | | | **Environnemental** | | | | |
| | 0,08 | | | | 0,08 | | | | | 0,42 | | | | | 0,42 | | | | |
| | **SOUS-CRITÈRES** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et des équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Durabilité de la solution | Performance de la solution - enlèvement des contaminants | Turbidité de l'eau et potentiel de relargage | Faisabilité de la solution | Flexibilité de la solution | Nuisances subies par les travailleurs et riverains | Acceptation du projet par le public | Accessibilité financière du projet par les contribuables | Gain social et restauration des usages du lac | Intégration à la communauté de façon structurante | Récupération des sédiments et/ou des matériaux | Gestion éco-responsable des contaminants | Qualité de l'eau et de l'air | Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution | **Vecteur de priorité global des sous-scénarios** |
| | 0,597 | 0,119 | 0,085 | 0,199 | 0,374 | 0,374 | 0,125 | 0,075 | 0,053 | 0,075 | 0,374 | 0,125 | 0,374 | 0,053 | 0,107 | 0,179 | 0,179 | 0,536 | |
| | **SOUS-SCÉNARIOS** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **A1** | 0,098 | 0,115 | 0,205 | 0,104 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,045 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,068 | 0,294 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,090** |
| **A2** | 0,294 | 0,115 | 0,068 | 0,104 | 0,122 | 0,086 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,085 | 0,306 | 0,086 | 0,068 | 0,294 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,137** |
| **B1** | 0,059 | 0,115 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,258 | 0,405 | 0,104 | 0,415 | 0,068 | 0,254 | 0,306 | 0,258 | 0,205 | 0,059 | 0,366 | 0,226 | 0,245 | **0,231** |
| **B2** | 0,098 | 0,191 | 0,041 | 0,045 | 0,366 | 0,258 | 0,135 | 0,312 | 0,138 | 0,338 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,097 | 0,147 | **0,185** |
| **C1** | 0,059 | 0,191 | 0,068 | 0,062 | 0,122 | 0,258 | 0,135 | 0,104 | 0,138 | 0,113 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,170** |
| **C2** | 0,098 | 0,191 | 0,205 | 0,062 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,105 | **0,088** |
| **D** | 0,294 | 0,082 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,037 | 0,081 | 0,312 | 0,059 | 0,338 | 0,051 | 0,061 | 0,037 | 0,041 | 0,059 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,098** |

**Tableau I - 4 : Calcul des scores de performance des sous-scénarios - Situation IV (Le gain de capital politique) : [Tech. = Soc.] > Écon. > Env.**[29]

| | CRITÈRES | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Économique | | | | Technique | | | | | Social | | | | | Environnemental | | | |
| | 0,13 | | | | 0,39 | | | | | 0,39 | | | | | 0,08 | | | |
| | SOUS-CRITÈRES | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et des équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Durabilité de la solution | Performance de la solution - enlèvement des contaminants | Turbidité de l'eau et potentiel de relargage | Faisabilité de la solution | Flexibilité de la solution | Nuisances subies par les travailleurs et riverains | Acceptation du projet par le public | Accessibilité financière du projet par les contribuables | Gain social et restauration des usages du lac | Intégration à la communauté de façon structurante | Récupération des sédiments et/ou des matériaux | Gestion éco-responsable des contaminants | Qualité de l'eau et de l'air | Récupération de l'écosystème et de la biodiversité après implantation de la solution | **Vecteur de priorité global des sous-scénarios** |
| | 0,597 | 0,119 | 0,085 | 0,199 | 0,374 | 0,374 | 0,125 | 0,075 | 0,053 | 0,075 | 0,374 | 0,125 | 0,374 | 0,053 | 0,107 | 0,179 | 0,179 | 0,536 | |
| | SOUS-SCÉNARIOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **A1** | 0,098 | 0,115 | 0,205 | 0,104 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,045 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,068 | 0,294 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,078** |
| **A2** | 0,294 | 0,115 | 0,068 | 0,104 | 0,122 | 0,086 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,085 | 0,306 | 0,086 | 0,068 | 0,294 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,122** |
| **B1** | 0,059 | 0,115 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,258 | 0,405 | 0,104 | 0,415 | 0,068 | 0,254 | 0,306 | 0,258 | 0,205 | 0,059 | 0,366 | 0,226 | 0,245 | **0,214** |
| **B2** | 0,098 | 0,191 | 0,041 | 0,045 | 0,366 | 0,258 | 0,135 | 0,312 | 0,138 | 0,338 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,097 | 0,147 | **0,228** |
| **C1** | 0,059 | 0,191 | 0,068 | 0,062 | 0,122 | 0,258 | 0,135 | 0,104 | 0,138 | 0,113 | 0,254 | 0,102 | 0,258 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,147 | **0,178** |
| **C2** | 0,098 | 0,191 | 0,205 | 0,062 | 0,122 | 0,052 | 0,081 | 0,062 | 0,083 | 0,048 | 0,051 | 0,061 | 0,052 | 0,205 | 0,098 | 0,122 | 0,135 | 0,105 | **0,081** |
| **D** | 0,294 | 0,082 | 0,205 | 0,312 | 0,073 | 0,037 | 0,081 | 0,312 | 0,059 | 0,338 | 0,051 | 0,061 | 0,037 | 0,041 | 0,059 | 0,073 | 0,135 | 0,105 | **0,100** |

[29] La page suivante montre un exemple de calcul des poids alloués aux composantes de chaque niveau et du calcul du vecteur de priorité globale au respect du code de couleurs présenté dans le tableau I-4.

**Exemple 1 – Poids des critères (couleur rouge)**

| | Écon. | Techn. | Social | Environ. | Écon. | Techn. | Social | Environ. | Σ | Σ/4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Écon. | 1,00 | 0,33 | 0,33 | 1,67 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,53 | 0,13 |
| Techn. | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 5,00 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 1,58 | 0,39 |
| Social | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 5,00 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 1,58 | 0,39 |
| Environ. | 0,60 | 0,20 | 0,20 | 1,00 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,32 | 0,08 |
| Σ | 7,60 | 2,53 | 2,53 | 12,67 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 4,00 | 1,00 |

**Exemple 2 – Poids des sous-critères (couleur bleue)**

| | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Investissement initial du projet | Coût d'entretien et de suivi | Disponibilité des matériaux et équipements | Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | Σ | Σ/4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Investissement initial du projet | 1,00 | 5,00 | 7,00 | 3,00 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 2,39 | 0,597 |
| Coût d'entretien et de suivi | 0,20 | 1,00 | 1,40 | 0,60 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,48 | 0,119 |
| Disponibilité des matériaux et équipements | 0,14 | 0,71 | 1,00 | 0,43 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,34 | 0,085 |
| Disposition et valorisation des résidus (sédiments) | 0,33 | 1,67 | 2,33 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,80 | 0,199 |
| Σ | 1,68 | 8,38 | 11,73 | 5,03 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 4,00 | 1,00 |

**Exemple 3 – « Poids » de performance des sous-scénarios par critère (couleur verte)**

| | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | C2 | D | Σ | Σ/7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 1,00 | 0,33 | 1,67 | 1,00 | 1,67 | 1,00 | 0,33 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,69 | 0,098 |
| A2 | 3,00 | 1,00 | 5,00 | 3,00 | 5,00 | 3,00 | 1,00 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 2,06 | 0,294 |
| B1 | 0,60 | 0,20 | 1,00 | 0,60 | 1,00 | 0,60 | 0,20 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,41 | 0,059 |
| B2 | 1,00 | 0,33 | 1,67 | 1,00 | 1,67 | 1,00 | 0,33 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,69 | 0,098 |
| C1 | 0,60 | 0,20 | 1,00 | 0,60 | 1,00 | 0,60 | 0,20 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,41 | 0,059 |
| C2 | 1,00 | 0,33 | 1,67 | 1,00 | 1,67 | 1,00 | 0,33 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,69 | 0,098 |
| D | 3,00 | 1,00 | 5,00 | 3,00 | 5,00 | 3,00 | 1,00 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 2,06 | 0,294 |
| Σ | 10,20 | 3,40 | 17,00 | 10,20 | 17,00 | 10,20 | 3,40 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 7,00 | 1,00 |

**Exemple 4 – Calcul du vecteur de priorité global pour A1 (couleur jaune)**

A1 = 0,13×[(0,957×0,098) + (0,119×0,115) + (0,085×0,205) + (0,199×0,104)] + 0,39×[(0,374×0,122) + (0,374×0,052) + (0,125×0,081) + (0,075×0,045) + (0,053×0,083)] + 0,39×[(0,075×0,048) + (0,374×0,051) + (0,125×0,061) + (0,374×0,052) + (0,053×0,068)] + 0,08×[(0,107×0,294) + (0,179×0,073) + (0,179×0,135) + (0,536×0,105)] = 0,078