

*Alain
Lefebvre*

Élaboration d'un projet pilote
d'aménagement faunique à partir
de déblais de dragage dans
le lac Saint-Pierre

Jean-Claude Belles-Isles, biologiste, MSc, chargé de projet

Michel Belles-Isles, biologiste, PhD

Marc Drouin, ingénieur, MSc

Jean-Pierre Fau, ingénieur, MSc

Claire Filteau, urbaniste

Marc Morin, ingénieur

Jacqueline Roy, biologiste, MSc

Roche Ltée

et

Raymond Juneau, ingénieur MSc

LEQ

Rédigé pour le centre Saint-Laurent
Conservation et protection
Environnement Canada

Mai 1991

NOTRE FLEUVE

Ce feuillet d'information est publié dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent dont l'objectif principal est de réduire de 90 p. 100 les rejets liquides toxiques des 50 établissements industriels jugés les plus polluants. Le Plan d'action Saint-Laurent est une initiative d'Environnement Canada en collaboration avec Industrie, Science et Technologies Canada et Pêches et Océans. Il vise à protéger, conserver et restaurer le Saint-Laurent. Le Plan s'étale sur cinq ans et 110 millions de dollars ont été alloués pour sa réalisation. Pour le mener à bien, Environnement Canada a créé le Centre Saint-Laurent, plaque tournante des activités à caractère scientifique et technique associées au Plan d'action Saint-Laurent. Il regroupe quatre Directions dont celle du développement technologique qui a entre autres pour objectif la recherche de solutions acceptables pour la disposition des sédiments de dragage dans le Saint-Laurent. Le présent rapport s'inscrit dans cette démarche.

OUR RIVER

This information leaflet is published as part of the St. Lawrence Action Plan whose main objective is to reduce by 90% the toxic liquid waste produced by the 50 industries considered to be the most serious polluters. The St. Lawrence Action Plan was initiated by Environnement Canada, in cooperation with Industry, Sciences and Technology Canada, and Fisheries and Oceans, with the goal of protecting, conserving and restoring the St. Lawrence. The Plan will extend over a five year period and \$ 110 million has been allocated for its implementation. To ensure the success of the Plan, Environnement Canada has created the St. Lawrence Centre, the hub of the Plan's scientific activities. The Centre comprises four branches, including the technological development sector which aims to the application of acceptable solutions for the disposition of dredged sediments of the St. Lawrence river. The present report is part of this approach.

AVIS DE RÉVISION

Le présent rapport a été examiné par le Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marques de commerce ou de produits commerciaux ne signifient en aucun cas que leur utilisation est recommandée.

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Les lecteurs qui voudraient faire des commentaires sur le contenu du présent rapport peuvent s'adresser à la Direction du développement technologique, Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, Montréal, Québec, H2Y 2E7.

AVANT-PROPOS

Nous tenons à remercier messieurs Yvon Ouellet et Marcel Frenette de l'université Laval pour avoir participé à des discussions sur le choix du site d'intervention et sur l'importance des agents érosifs dans l'élaboration du concept.

Nous soulignons également la participation de monsieur Denis Caron de Verreault Navigation, qui a donné certains conseils sur les modes et techniques de réalisation ainsi que sur les coûts de construction.

Messieurs Jacques Locat, Denis Isabelle, Marc-André Bérubé et Serge Leroueil du Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur de l'université Laval ont préparé un document sur l'utilisation d'agents stabilisateurs dans le but d'accélérer et également d'accroître la stabilisation des boues de dragage. Pendant ce travail, ils ont émis des commentaires judicieux sur la mise en place et le comportement géotechnique de l'ouvrage.

Enfin, monsieur Robert Vaillancourt de Procéan Inc. a participé à l'évaluation de la faisabilité environnementale du concept retenu.

RÉSUMÉ

Le présent rapport a pour but d'élaborer un concept d'aménagement faunique à partir de résidus de dragage. Un tel aménagement permettrait de solutionner, à court et à moyen terme, dans un site favorable, le problème soulevé par le dépôt des résidus de dragage dans le lac Saint-Pierre, tout en offrant la possibilité d'y entreposer les résidus résultant des éventuels travaux de décontamination des ports de Sorel et de Trois-Rivières.

Sept aménagements ont ainsi été conçus en tenant compte des contraintes spécifiques au lac Saint-Pierre (érosion par les glaces et les vagues, fondation argileuse du lac, richesse faunique du secteur, nature et quantité de matériaux) et de modes de réalisation dans un lac peu profond. L'aménagement retenu est composé, dans sa partie amont, d'un îlot et d'un marais reposant sur une assise dont le coeur peut être constitué de matériaux faiblement contaminés. A l'aval et adjacent à ces habitats se trouve un haut-fond qui pourra éventuellement servir d'assise à un second îlot une fois l'ouvrage terminé. Le site sera donc à même de recevoir des matériaux pendant de nombreuses années. L'aménagement devra être localisé à l'amont du lac, du côté sud du chenal, là où le couvert de glace est stable. De plus, afin d'éviter l'érosion excessive de l'ouvrage, celui-ci devra être protégé des vagues de vent et de batillage par des hauts-fonds naturels.

Avant l'élaboration des plans et devis finals, des travaux de caractérisation du site et des matériaux de dragage devront être réalisés afin d'obtenir les données de base essentielles à l'élaboration d'un projet viable techniquement et environnementalement.

Il est également recommandé qu'un suivi soit réalisé dès le début des travaux afin de mesurer la stabilité générale de l'ouvrage, la réelle innocuité de l'aménagement sur l'environnement du lac Saint-Pierre et la richesse des habitats créés pour la faune avienne et ichtyenne. Les données recueillies permettront de démontrer le bien-fondé de l'utilisation des résidus de dragage contaminés ou non à des fins d'aménagements fauniques.

ABSTRACT

The present report aims to present a wildlife development concept using dredging residues. Such a development in a favourable site would allow the short and medium term resolution of the problem arising from the disposal of dredging residues in the Lac Saint-Pierre. At the same time, it offers possibilities for storage of waste from the Sorel and the Trois-Rivières harbour decontamination works.

Seven projects were thus conceived that take into account the constraints specific to Lac Saint-Pierre (ice and wave erosion, clay foundation of the lake, the richness of wildlife in the sector, the nature and the quantity of materials) and the modes of development in shallow lakes. In its upstream section, the chosen design is comprised of an island and marsh resting on a foundation whose core may consist of contaminated materials. Downstream and adjacent to the habitats, there is a shoal that could eventually serve as the base for a second island once the work is completed. The site would therefore accomodate materials over many years. The development should be located at the upstream end of the lake, on the south side of the channel, where the ice cover is stable. Also, in order to avoid excessive erosion, the work should be protected by natural shoals from waves caused by wind and boating.

Before the final plans and specifications are prepared, the site and dredging materials will be characterized in order to obtain basic data essential to the presentation of a technically and environmentally viable project.

It is also recommended that a follow-up of the construction project be carried out from the outset in order to measure the overall stability of the work, the project's real harmlessness for the environment of Lac Saint-Pierre and the wealth of habitats developed for the avian and ichtyan fauna. The collected data will show that using dredged materials, whether they are contaminated or not, for the development of wildlife habitats is a well-founded concept.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIERES	viii
LISTE DES FIGURES, DES TABLEAUX, DES CARTES	x
1. INTRODUCTION	1
2. CONTENU DE L'ÉTUDE	3
3. CHOIX D'UN AMÉNAGEMENT ET DE SA LOCALISATION	4
3.1 Contraintes de réalisation spécifiques au lac Saint-Pierre	4
3.1.1 Compaction du lit	6
3.1.2 Action des glaces	6
3.1.3 Action des vagues	7
3.1.4 Action des courants	7
3.1.5 Quantité et caractéristiques des matériaux	8
3.1.6 Sensibilité du milieu	9
3.2 Caractéristiques des différents aménagements proposés	9
3.2.1 Hauteur du sommet de l'ouvrage	11
3.2.1.1 Ilot	13
3.2.1.2 Marais	16
3.2.1.3 Haut-fond	16
3.2.1.4 Autres aménagements	16
3.2.2 Superficie	16
3.2.3 Forme	17
3.2.4 Pente	18
3.3 Description des différents aménagements proposés	18
3.3.1 Famille d'aménagements pour couvert de glace stable	19
3.3.1.1 Esquisse-type d'un îlot	19
3.3.1.2 Esquisse-type d'un marais	19
3.3.1.3 Esquisse-type d'un haut-fond	22
3.3.1.4 Esquisse-type d'un îlot-marais	22
3.3.1.5 Esquisse-type d'un îlot-marais avec haut-fond	22
3.3.2 Famille d'aménagements pour couvert de glace instable	22
3.3.2.1 Esquisse-type d'un îlot-marais type atoll	22
3.3.2.2 Esquisse-type d'un îlot-marais type atoll avec haut-fond	26
3.4 Evaluation des différents aménagements proposés	26
3.4.1 Résultats de l'évaluation	29
3.5 Localisation de l'aménagement retenu	30

3.5.1	Détermination du secteur préférable	31
3.5.2	Détermination des emplacements potentiels	31
3.5.3	Comparaison des emplacements potentiels	33
3.5.3.1	Facteurs considérés	33
3.5.3.2	Analyse et choix	35
4.	DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU PROJET RETENU	38
4.1	Plan d'ensemble et mode de réalisation	38
4.1.1	Etape 1	38
4.1.2	Etape 2	41
4.1.3	Etape 3	41
4.2	Mise en végétation	42
4.2.1	Espèce végétale retenue	42
4.2.2	Mode de plantation	42
4.2.3	Préparation du substrat	43
4.2.3.1	Amendements	43
4.2.4	Technique d'ensemencement	43
4.2.5	Taux d'ensemencement	44
4.2.6	Entretien	44
4.2.7	Période d'ensemencement	44
4.3	Mode de réalisation	44
4.4	Etudes préliminaires	45
4.5	Surveillance des travaux et suivi	46
5.	ÉVALUATION DU PROJET	48
5.1	Faisabilité technique	48
5.2	Faisabilité économique	48
5.3	Répercussions environnementales	50
6.	ASPECTS LEGAUX	52
7.	CONCLUSION	53
8.	BIBLIOGRAPHIE	55

ANNEXE 1 Qualité des sédiments au port de Sorel et dans le chenal de navigation du lac Saint-Pierre

ANNEXE 2 Stabilisation des boues de dragage

ANNEXE 3 Prévision des tassements de l'aménagement retenu selon quatre hypothèses sur la nature des fonds du lac Saint-Pierre

LISTE DES FIGURES

1	Niveau d'eau au lac Saint-Pierre (Québec 1975-1978)	12
2	Courbe des tassements	14
3	Esquisse-type d'un îlot	20
4	Esquisse-type d'un marais	21
5	Esquisse-type d'un haut-fond	23
6	Esquisse-type d'un îlot-marais	24
7	Esquisse-type d'un îlot-marais avec haut-fond	25
8	Esquisse-type d'un îlot-marais type atoll	27
9	Esquisse-type d'un îlot-marais type atoll avec haut-fond	28
10	Ebauche du plan d'aménagement retenu	39

LISTE DES TABLEAUX

1	Sommaire de la quantité et de la qualité des matériaux disponibles dans le lac Saint-Pierre et aux ports de Sorel et de Trois-Rivières	10
2	Caractéristiques des emplacements potentiels	36
3	Estimation et partage des coûts entre les intervenants	49

LISTE DES CARTES

1	Localisation du secteur d'intervention	5
2	Zonation en fonction de la stabilité du couvert de glace	32
3	Localisation des emplacements potentiels	34

1. INTRODUCTION

Le fleuve Saint-Laurent est, depuis fort longtemps, une voie navigable importante et un élément essentiel au maintien et à la croissance de l'économie des communautés riveraines. L'augmentation soutenue de la navigation commerciale, en particulier depuis la réalisation de la voie maritime, nécessite de nombreux travaux de dragage pour l'entretien du chenal maritime et des ports existants.

Les travaux de dragage peuvent cependant avoir des répercussions importantes sur l'environnement et ce, à toutes les étapes de l'opération, que ce soit lors de l'extraction, du transport, de la disposition des sédiments aux sites prévus pour leur confinement ou encore lors de leur rejet en eau libre. Toutefois, comme plusieurs interventions l'ont démontré au cours des vingt ou trente dernières années, la disposition des matériaux dragués est compatible avec une politique de mise en valeur et de bonification du milieu lorsque ces déblais sont utilisés à des fins de restauration ou de création d'aménagements fauniques et de développement pour les activités humaines. Ainsi, aux États-Unis, depuis vingt ans, plusieurs travaux ont évalué la possibilité d'utiliser des déblais de dragage afin de créer des habitats pour la faune. Plusieurs zones de déversement de résidus de dragage sont effectivement devenues, après remblaiement, des habitats propices pour la faune.

Conscients de la problématique associée à la gestion des sédiments dragués et soucieux d'exploiter le potentiel d'utilisation de ces matériaux pour la restauration ou la création d'aménagements, les responsables du Centre Saint-Laurent ont commandé une étude bibliographique sur le sujet (Roche, 1990). Cette étude avait pour objectifs d'orienter les éventuels travaux d'aménagement en tirant profit des expériences étrangères et de fournir une information pertinente sur les sites d'intervention les plus souhaitables pour le fleuve Saint-Laurent. Les auteurs de ce rapport faisaient ressortir la nécessité de réaliser un projet pilote dans le but d'évaluer concrètement la faisabilité des projets d'utilisation des matériaux dragués à des fins d'aménagement faunique.

Le Centre Saint-Laurent, en collaboration avec Transports Canada et le Service canadien de la Faune, a mandaté la firme Roche Ltée - Groupe Conseil (1990) afin d'élaborer un projet d'aménagement faunique dans le lac Saint-Pierre, un secteur soumis à de fréquents dragages d'entretien et où le dépôt des matériaux dragués soulève une réticence grandissante de la part des agences vouées à la préservation du milieu.

Tout en contribuant à solutionner les problèmes locaux soulevés par la disposition des matériaux dragués dans le lac Saint-Pierre ainsi que dans les ports de Sorel et de Trois-Rivières, où des travaux de décontamination pourraient éventuellement être menés, cette étude marque une étape importante dans le plan d'Action Saint-Laurent en ce qui concerne la recherche de solutions concrètes et acceptables concernant la gestion des matériaux de dragage dans le Saint-Laurent.

2. CONTENU DE L'ÉTUDE

L'étude est divisée en quatre sections principales. La première section décrit la démarche utilisée afin de sélectionner le projet d'aménagement permettant à la fois d'emmagasiner les matériaux qui seront dragués au cours des prochaines années dans le secteur du Lac Saint-Pierre et d'offrir des habitats à fort potentiel pour la faune ichthyenne et avienne. De façon plus précise, cette première section comprend :

- . une description sommaire des contraintes de réalisation spécifiques au secteur d'intervention ;
- . une description des critères utilisés pour la conception du projet ;
- . une description et une comparaison des différents aménagements possibles ;
- . une évaluation des sites potentiels de localisation de l'aménagement retenu.

La seconde section se veut une description détaillée du projet retenu à l'étape précédente.

Elle inclut :

- . le plan d'ensemble du projet pilote ;
- . les méthodes d'exécution des travaux ;
- . la méthode de mise en végétation ;
- . des recommandations particulières.

Enfin, une revue des aspects légaux et une évaluation globale du projet sur les plans technique, économique et environnemental sont présentées en dernier lieu.

3. CHOIX D'UN AMÉNAGEMENT ET DE SA LOCALISATION

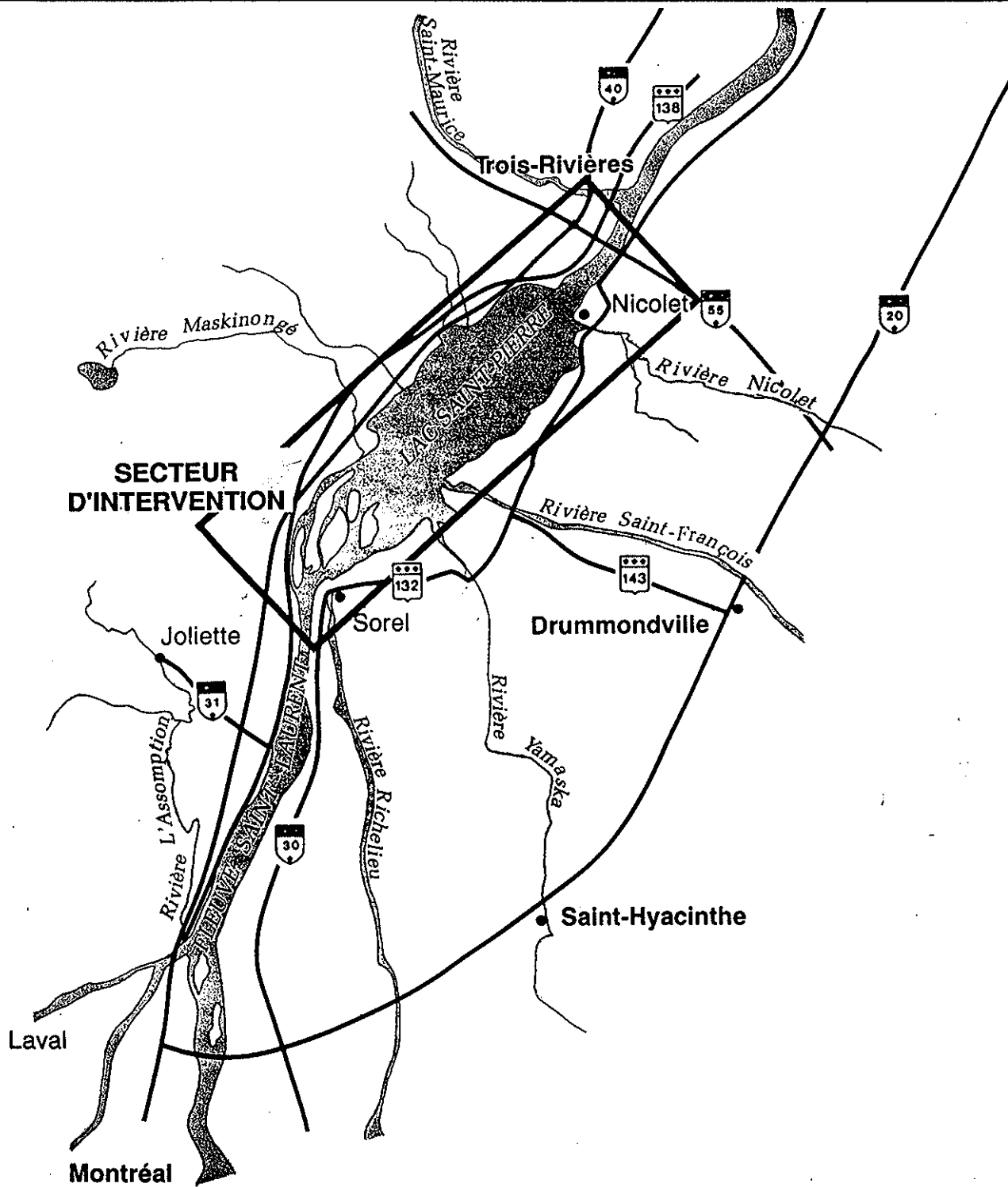
Cette section définit les principales contraintes physiques et environnementales du lac Saint-Pierre pouvant affecter les travaux d'aménagement projetés ou leur localisation. Dans un second temps, on présente les caractéristiques auxquelles l'aménagement devra se conformer de manière à assurer sa pérennité et son utilisation optimale par la faune.

A l'aide de ces éléments de problématique et de ces critères, sept types d'aménagement sont proposés. Une analyse comparative a permis de choisir celui qui fera l'objet du projet-pilote. Enfin, le choix de son emplacement termine cette première partie de l'étude.

3.1 Contraintes de réalisation spécifiques au Lac Saint-Pierre

Le lac Saint-Pierre constitue un élargissement du fleuve Saint-Laurent entre Sorel et Trois-Rivières (carte 1). En amont, plusieurs îles sont présentes tandis qu'en aval on retrouve le plan d'eau proprement dit. Celui-ci, peu profond (moyenne de 3 m), s'étend sur une longueur d'environ 25 km et une largeur approximative de 10 km. Un chenal de navigation passe au sud de l'archipel de Berthier-Sorel puis traverse le lac en son centre. Ce chenal est dragué régulièrement entre Sorel et Trois-Rivières (35 km) afin d'y maintenir une profondeur minimale de 10,70 m. Une zone d'ancrage est présente au centre du lac, du côté sud de la voie maritime (ancrage Yamachiche). Des îlots de pierre, servant à retenir le couvert de glace, sont répartis de part et d'autre de la voie maritime, soit du côté sud pour les îlots amont et du côté nord pour ceux plus en aval.

Dans ce contexte, la création d'un aménagement faunique dans le lac Saint-Pierre se heurte à une série de contraintes spécifiques en plus des problèmes techniques liés à l'utilisation des résidus de dragage à des fins utilitaires. Parmi ces contraintes, nous avons identifié la faible capacité portante des fonds, l'effet érosif des vagues, des courants et des glaces, la sensibilité du milieu du point de vue des ressources biologiques et de l'utilisation du plan d'eau. La quantité relativement faible des matériaux à rejeter et leurs caractéristiques constituent également des contraintes dont il faudra tenir compte. Le lecteur trouvera une brève description de ces contraintes dans les paragraphes suivants.



ROCHÉ



N° de projet : 10948

Échelle 1 : 750 000

0 7,5 15,0 22,5 30,0 km



Tiré de : HBA, 1989

LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Localisation du
secteur d'intervention

Carte 1

3.1.1 Compaction du lit - Le lit du lac Saint-Pierre se compose de trois couches de dépôts. La couche la plus profonde, composée de matériaux morainiques, a une épaisseur pouvant dépasser 60 m. Sur celle-ci repose une couche d'argile à haute plasticité d'à peu près 20 m d'épaisseur. A la surface du lit, on retrouve un matériau sablonneux ou limoneux d'origine lacustre et fluvatile (HBA, 1989). Ce lit stratifié en trois couches successives possède des propriétés de compaction non négligeables qui font que les aménagements s'enfonceront graduellement avec le temps.

A titre d'exemple, les îlots artificiels construits en 1970, du côté nord du chenal, pour retenir le couvert de glace ont connu des tassements importants (0,6 m) la première année. L'enfoncement de ces îlots devrait même atteindre 3 m après un siècle, selon certaines estimations (Danys, 1972). Pour ceux projetés au sud, en 1988, les tassements étaient estimés à 0,8 m la première année, puis à 4 m après un siècle (Terratect, 1988a, b).

On devra donc tenir compte de ce phénomène de tassement des sédiments dans la conception de l'aménagement. La durée de vie devra être suffisamment longue pour qu'après quelques années d'enfoncement l'ouvrage soit encore utilisable par la faune.

3.1.2 Action des glaces - Jusqu'à présent, la majorité des aménagements fauniques créés à partir de déblais de dragage ont été réalisés plus au sud (États-Unis - Golfe du Mexique), où les problèmes liés à l'érosion par les glaces étaient inexistantes ou presque. Dans le lac Saint-Pierre, les glaces forment de grands couverts de batture, de part et d'autre du chenal où descendent des plaques de glaces morcelées par la navigation. Ces glaces sont susceptibles d'avoir une action dégradante importante sur les aménagements proposés. Dans les zones de couvert instable, à la débâcle, poussées par les courants et les vents, elles peuvent monter sur le haut des plages, cisailer le sol et y arracher la végétation. L'aménagement devra donc être protégé artificiellement avec des talus à pente forte, pour empêcher autant que possible que les glaces empiètent sur les berges, ou être localisé aux endroits où le couvert de glace est le plus stable possible et le risque d'érosion faible.

3.1.3 Actions des vagues - A cause de l'action érosive évidente des vagues, leurs effets ne doivent pas être négligés. Dans le lac Saint-Pierre, les vagues sont générées par le vent et par le passage des bateaux. Les caractéristiques des vagues produites par le vent dépendent grossièrement de deux facteurs, soit l'intensité du vent et son emprise sur le plan d'eau (fetch).

D'après les statistiques des vents compilées à la station de Louiseville pour la période s'étendant de 1977 à 1984, les vents dominants proviennent des directions ouest et nord-est. Ces directions diffèrent cependant légèrement d'une rive à l'autre. Ainsi, compte tenu du fetch disponible, les rives sud-ouest et est du lac reçoivent les vagues de vent les plus importantes. Ces vagues peuvent atteindre des hauteurs d'environ un mètre pour des rafales de 80 km/h et un fetch de 25 km.

Quant aux vagues engendrées par le passage des navires, elles peuvent atteindre une hauteur de près d'un demi mètre pour une embarcation se déplaçant à 12 noeuds (22 km/h). Ces vagues de batillage s'atténuent cependant rapidement à mesure qu'elles s'éloignent du chenal de navigation pour être pratiquement imperceptibles après 1,5 km.

L'aménagement devra donc être protégé artificiellement ou naturellement des vagues de vent et de batillage pour éviter un sapement trop important de ses berges.

3.1.4 Action des courants. - Les courants d'eau sont également susceptibles d'avoir une action érosive ou déstabilisatrice sur l'aménagement proposé. Ces effets ne doivent pas être négligés. Dans le lac Saint-Pierre, les courants atteignent des vitesses supérieures à 0,6 m/s à la hauteur du chenal de navigation tandis que, près des rives, où les profondeurs sont inférieures à 1,0 m, ils sont très faibles et inférieurs à 0,01 m/s. Dans la zone de profondeurs intermédiaires (1 à 5 m) située du côté nord du chenal, les vitesses sont de l'ordre de 0,15 à 0,30 m/s comparativement à une fourchette de 0,01 à 0,15 m/s pour la même zone située du côté sud (Centreau 1974). Toutefois, dans les chenaux secondaires localisés au nord-est de la pointe des Îles, les vitesses des courants peuvent atteindre des valeurs de 0,60 m/s (Roche 1990). Des vitesses induites par les vents peuvent se superposer à ces courants. Elles sont toutefois réduites, voire négligeables en général, atteignant 0,03 m/s pour des vents de 80 km/h.

Dans la mesure du possible, l'aménagement devra être localisé de façon à éviter les zones où les courants sont trop importants.

3.1.5 Quantité et caractéristiques des matériaux. - Les matériaux dragués ont des caractéristiques différentes selon leur lieu d'origine. De plus, les quantités varient d'une année à l'autre.

Les sédiments provenant de l'entretien annuel du chenal de navigation par dragage sont constitués de sable et leur volume n'est que d'environ 15 000 m³. Selon Jacques Laliberté, les secteurs préférentiels de sédimentation dans ce chenal sont situés près de l'ancrage, du côté amont (secteur D-13). D'après les résultats des analyses de quelques rares échantillons, ces sédiments ne semblent pas être contaminés (annexe 1).

Les volumes originant du nettoyage des talus (prévu en 1991) et de l'entretien de l'ancrage (réalisé en 1990) sont beaucoup plus importants. Ces dragages ne sont cependant réalisés que tous les 8 à 10 ans et contiennent des matériaux plus fins tels des sables-silteux et des silts (Jacques Laliberté, comm. pers.)¹. Les volumes varient mais sont généralement de l'ordre de 30 000 m³ pour les talus et de 60 000 m³ pour l'ancrage.

Quant au port de Sorel, les travaux de décontamination qui y sont prévus impliqueraient un volume d'environ 30 000 m³ (Denis Trudel, comm. pers.) de sables silteux contaminés par divers métaux lourds (principalement Cr, Cu, Pb, Zn) et par des BPC. L'importance de cette contamination varie selon les métaux ; elle dépasse de 30 % les concentrations admises par le Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent (1978) dans le cas du chrome et du zinc et atteint même trois fois ces critères dans le cas du plomb. Les concentrations de BPC sont, pour leur part, sept à huit fois plus importantes que les critères proposés (annexe 1).

Une autre source de matériaux pourrait facilement être incluse dans les matériaux à confiner ; il s'agit des 8000 m³ de sédiments provenant annuellement du port de Trois-Rivières (Paul Alain, comm. pers.). On a noté une certaine contamination de ces derniers sédiments mais

¹ Il n'y a pratiquement pas d'échantillonnage permettant d'établir les propriétés physiques et chimiques de ces matériaux et aucune caractérisation mécanique.

seuls le zinc, le chrome, les huiles et graisses et la teneur en carbone organique causent une certaine contamination locale (Gilbert et Baribeau, 1990). Les concentrations observées excèdent les critères de qualité des sédiments mais demeurent quant même dans le même ordre de grandeur que ceux-ci, proches de cette limite.

On retrouve au tableau 1 un sommaire des volumes de matériaux dragués, la fréquence des dragages et les caractéristiques des matériaux disponibles dans la région du lac Saint-Pierre.

L'aménagement devra donc convenir tant aux faibles quantités de sable qu'aux importants volumes de matériaux fins, contaminés ou non.

3.1.6 Sensibilité du milieu. - Le lac Saint-Pierre, par la diversité des habitats qu'il présente, est un milieu exceptionnel pour la faune. La sensibilité de chacun des habitats est fonction à la fois de la superficie qu'il occupe, des espèces qui l'utilisent ainsi que de la valeur que lui attribue la communauté. A titre d'exemple, on peut penser notamment à la présence de l'esturgeon jaune, qui est associé aux habitats les plus profonds du lac en période estivale et qui est une ressource importante pour les pêcheurs commerciaux, ou encore à l'abondance de la faune ichtyenne et avienne en général due à la présence à cet endroit de la plus grande plaine de débordement au Québec.

D'autre part, à cause de la superficie du plan d'eau et de sa qualité faunique, nombreuses sont les utilisations humaines qui peuvent se révéler sensibles à l'implantation d'un aménagement (pêche commerciale et sportive, chasse, récréation, etc.).

La création d'un aménagement devrait donc interférer le moins possible avec les habitats productifs du lac et la qualité de vie de ses utilisateurs.

3.2 Caractéristiques des différents aménagements proposés

Cette section vise à définir les critères permettant de choisir l'aménagement le plus utile pour la faune et ceux qui permettront d'assurer la stabilité et la pérennité de l'aménagement. Les trois types d'aménagement de base considérés aux fins de la présente étude sont : l'îlot (de forme ronde ou du type atoll, le marais et le haut-fond. Des combinaisons constituées de deux ou des trois types sont également proposées pour un total de sept aménagements possibles.

TABEAU 1 Sommaire de la quantité et de la qualité des matériaux disponibles dans le lac Saint-Pierre et aux ports de Sorel et Trois-Rivières

	Volume (m³)	Fréquence des dragages	Granulométrie	Contamination
Port de Sorel				
Lac Saint-Pierre				
Chenal de navigation	30 000	1 fois	Sable et sable silteux	Métaux lourds (Cr, Cu, Pb, Zn) et BPC
	15 000	Annuelle	Sable	Aucune
	30 000 (talus)	8 à 10 ans	Sable silteux	Aucune
Ancrage Yamachiche	60 000	10 ans	Silt	Aucune
Port de Trois-Rivières	8 000	Annuelle	Sable silteux	Métaux lourds (Cr, Zn, huiles et graisses, carbone organique)

3.2.1 Hauteur du sommet de l'ouvrage. - Les trois types d'aménagement de base sont définis ici en fonction de leur hauteur par rapport au niveau d'eau. Ainsi, un îlot doit demeurer émergé en permanence, même lors de la crue annuelle tandis que le marais et le haut-fond sont continuellement submergés. Dans le cas du marais, le fond doit se situer à une profondeur de 0,15 à 1 m par rapport aux basses eaux moyennes tandis que dans le dernier cas, cette profondeur doit varier de 1,0 à 2,0 m (Denis Jacques, 1980).

Afin de respecter ces critères, la hauteur du sommet de l'aménagement doit être choisie avec attention, en tenant compte notamment des fluctuations du niveau d'eau ainsi que du tassement anticipé de l'aménagement.

A) Niveaux d'eau.- Les fluctuations du niveau d'eau (marégraphique) sont données à la station Lac Saint-Pierre (1978-1988), située dans le tiers amont². Pour les fins de la comparaison, les niveaux amont et aval du lac sont considérés identiques entre ses deux extrémités. En réalité, la différence de niveau est de l'ordre de 0,3 m si l'on fait abstraction des effets du cycle de marée. De la figure 1, on peut tirer les renseignements suivants :

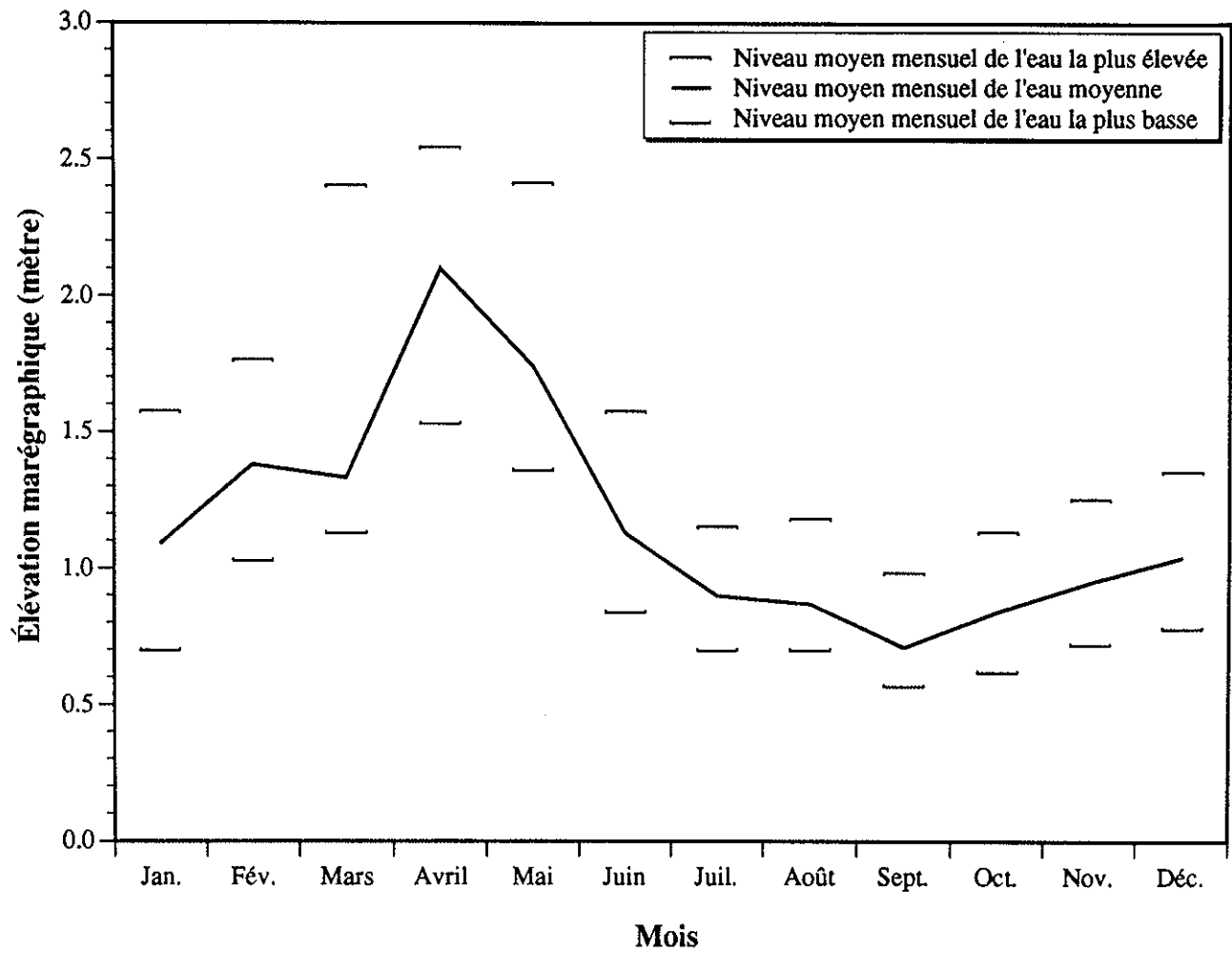
- le niveau minimal moyen a lieu en septembre avec 0,7 m alors que le niveau le plus bas enregistré a été de 0,5 m
- le niveau minimal en été (juillet et août) est de 0,8 m
- le niveau moyen pendant la crue printanière (avril) est de 2,1 m alors que le niveau maximum mensuel pour cette période est de 2,5 m.

B) Tassements.- En raison de la nature du lit du lac Saint-Pierre (matériau argileux) un tassement sensible de l'aménagement est prévisible. Afin d'évaluer le comportement des aménagements posés sur un tel fond, nous avons tenté d'estimer l'importance de l'enfoncement et de déterminer s'ils se stabiliseraient avec le temps. Ces tassements ont été évalués à partir des propriétés géotechniques mesurées par Terratech (1988) vers l'extrémité aval du côté sud du chenal face au débouché de la Nicolet et par Samson et Garneau (1973) le long de l'autoroute 40 à Berthier. Le

² Pendant cette période d'observation, les débits du fleuve ont été relativement élevés si on les compare au cycle de la période 1960-1970 où le fleuve Saint-Laurent avait subi une série d'étiages :

- niveau minimal moyen (septembre) = 0,45 m
- niveau minimal moyen d'été (juillet, août) = 0,5 m
- niveau moyen en avril = 1,4 m

FIGURE 1 Niveau d'eau à la station Lac Saint-Pierre (Québec) pour la période 1978-1988



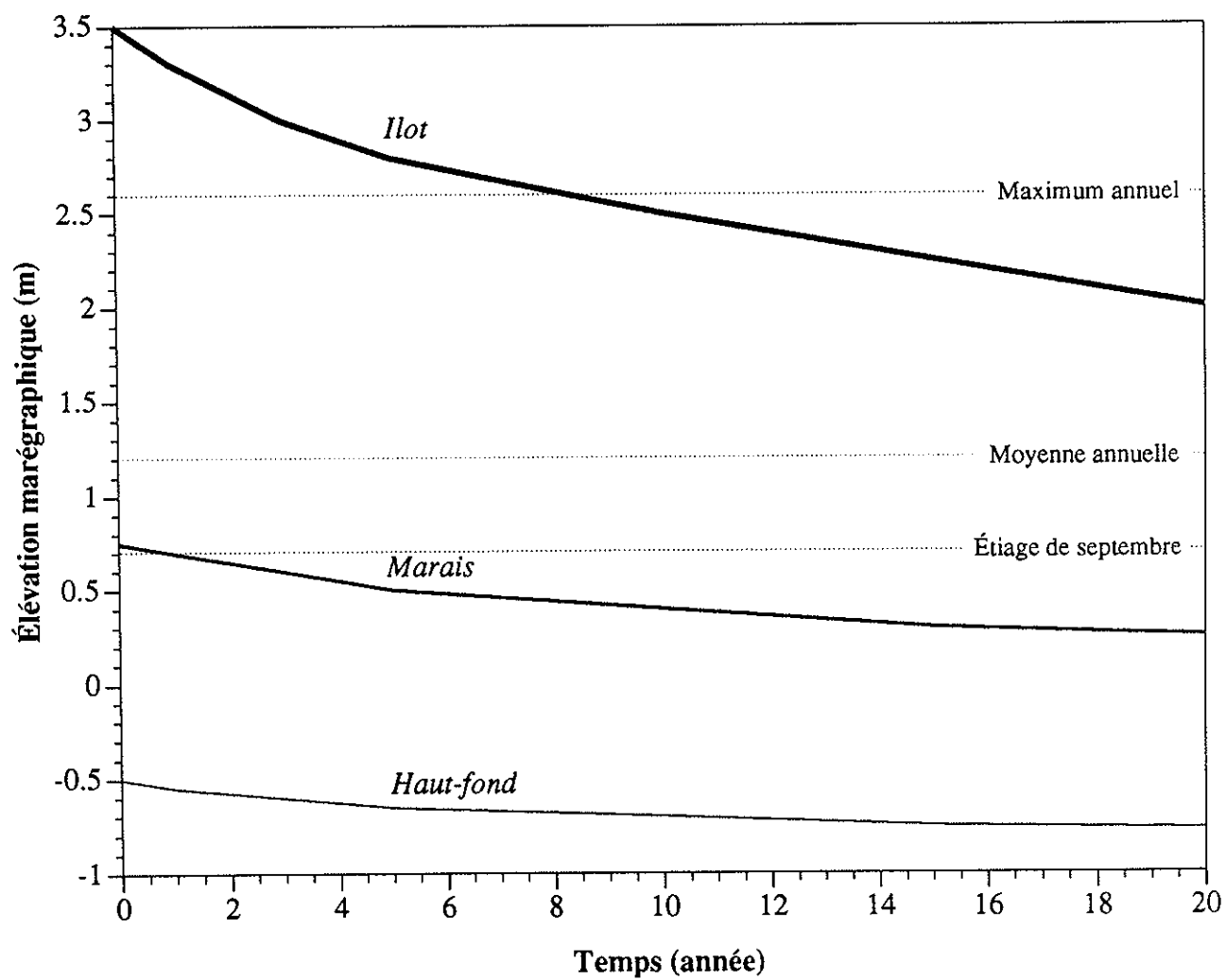
rapport des forages réalisés dans le lac Saint-Pierre par la Garde cotière canadienne, il y a plus de vingt ans, a également été utilisé afin de déterminer la composition et l'épaisseur du dépôt d'argile dans le secteur étudié. D'après ces rapports, une couche d'argile compressible d'environ 20 m d'épaisseur recouvre un dépôt d'argile surconsolidé et plus stable. A partir de ces données sédimentologiques, des estimations de l'enfoncement de l'aménagement en fonction du temps ont été calculées pour trois hauteurs initiales (3,5 ; 0,75 et - 0,5 m en élévation marégraphique).

Les courbes d'enfoncement tirées de ces calculs apparaissent à la figure 2. Il ressort de ces courbes, d'une part, que plus l'aménagement est élevé au départ, plus le tassement sera important et, d'autre part, que la majeure partie du tassement s'effectue durant les trois premières années pour diminuer graduellement par la suite. Il faut noter toutefois que ces calculs ne tiennent pas compte des tassements différentiels ni de la compaction des matériaux du coeur de l'aménagement.

Par ailleurs, certaines variations par rapport aux courbes de tassement calculées, dues simplement au fait que la construction de l'aménagement durera un certain temps, pourront apparaître. Il ne faut pas perdre de vue que ces courbes présupposent une construction instantanée ou très limitée dans le temps. Dans la réalité, il y aura déjà eu un début de compaction tout au cours de l'accumulation des sédiments sur le site et leur poids n'atteindra son influence maximale qu'avec la fin des travaux, parfois plusieurs années après leur début. Il n'y a actuellement aucune estimation de l'importance des variations par rapport aux courbes de la figure 2 dues à ce facteur, mais ce phénomène ne devra pas être ignoré lors de la conception finale, avant la mise en chantier.

3.2.1.1 ILOT. - Toute association de communautés végétales tend, en l'absence de facteurs contraignants, vers un stade mature appelé climax où la végétation est en équilibre avec les conditions du milieu. Dans l'écosystème riverain, des inondations occasionnelles et plus ou moins régulières empêchent le remplacement progressif des espèces de type émergent par des

FIGURE 2 Courbes des tassements



espèces franchement terrestres³. Le stade de transition que constitue la végétation riveraine se maintient donc de façon permanente. Si les inondations venaient à cesser, les communautés végétales se succéderaient vers un état climacique d'équilibre franchement terrestre. Un tel état n'offrirait plus un bon habitat pour les espèces riveraines (Secrétariat Archipel 1984).

De manière à maintenir les stades pionniers productifs de végétation riveraine, il faut s'assurer que la hauteur du sommet de l'aménagement sera telle que les fluctuations du niveau d'eau puissent retarder suffisamment l'évolution de la succession végétale (Secrétariat Archipel, 1984). Une élévation trop importante favorisera l'implantation des espèces végétales terrestres alors qu'à l'inverse les sites trop bas limiteront la richesse de la communauté végétale³.

Bélangier et al. (1989) ont démontré que les graminées hautes constituaient le couvert le plus propice à la nidification des canards barboteurs du Saint-Laurent. Ils suggèrent donc que la surface des nouvelles îles soit constituée en majorité de prairies hautes avec le *Phalaris roseau*, de préférence, comme espèce dominante. Afin de développer ce type de couvert, les îles devraient, selon eux, être inondées annuellement sur une grande portion de leur superficie. Pour ce faire, l'élévation des îles au-dessus du niveau de l'eau doit se confiner dans des limites assez précises.

Afin de déterminer la hauteur optimale de l'îlot, nous avons supposé que la végétation terrestre prendrait au moins cinq ans à s'implanter. Durant ces premières années, l'îlot pourrait émerger complètement sans inconvénient. Après cela, il importerait que l'îlot soit régulièrement inondé afin de conserver la végétation à un stade pionnier. Pour ce faire et compte tenu du tassement, la hauteur de l'îlot après cinq ans devrait se situer aux environs de 2,6 m (ce qui correspond à la crue annuelle maximale; figure 1). Afin d'obtenir une telle élévation après ce laps de temps, l'îlot devrait initialement être surélevé pour tenir compte des tassements. Cette cote initiale est évaluée à 3,5 m (figure 2).

³ L'île aux Sternes, en aval du lac Saint-Pierre, est un exemple d'aménagement où l'élévation était impropre au maintien d'espèces émergentes.

3.2.1.2 MARAIS. - Le marais a pour fonction d'offrir un habitat propice à l'élevage des canetons et à l'alimentation de la sauvagine ainsi qu'à la fraie de certaines espèces ichthyennes. Pour remplir ces rôles, les niveaux d'eau moyens en été (juillet) devraient se situer aux environs de 0,7 m.

En tenant compte de la période d'implantation naturelle de quatre à cinq ans pour la végétation aquatique et des tassements anticipés des sédiments du fond, la hauteur initiale de l'aménagement devrait idéalement être de 0,75 m. De cette façon, après quatre à cinq ans, la cote-niveau de l'aménagement aurait atteint 0,5 m (ou 0,7 m sous le niveau moyen annuel).

3.2.1.3 HAUT-FOND. - Le haut-fond a essentiellement comme objectif de créer une zone propice à la fraie de plusieurs espèces ichthyennes et à l'alimentation de la sauvagine. Le dessus du haut-fond devrait se situer entre 1 et 2 m de profondeur, après la période de quatre à cinq ans nécessaire à la colonisation végétale. Afin de maintenir une profondeur d'au moins 1 m, l'élévation initiale de l'aménagement devrait être de l'ordre de 0,5 m sous le niveau moyen de l'eau. De cette façon, après un tassement de quelques années (qui est beaucoup moins important à cette cote-niveau), la construction se retrouverait à une profondeur d'environ 1,2 m après 4 ans et 1,5 m sous le niveau minimal annuel après 20 ans.

3.2.1.4 AUTRES AMÉNAGEMENTS. - Les autres aménagements possibles (îlot avec marais, îlot avec marais et haut-fond, etc.) ne sont qu'une combinaison entre les différents aménagements ; les caractéristiques de hauteur restent donc les mêmes pour chaque partie correspondante.

3.2.2 Superficie. - Plusieurs études réalisées dans l'ouest du continent identifient la superficie de l'île comme un facteur important dans le processus de sélection du site de nidification par les anatidés (canards, oies, etc.). Ces études ont ainsi démontré que les îles de moins de 2 ha supportaient généralement les plus fortes densités de nids. L'étude de Bélanger et al. (1989), qui portait sur l'utilisation par la faune d'îles du Saint-Laurent, a permis de confirmer que les îles de petites dimensions sont effectivement les plus recherchées comme sites de nidification. Par

conséquent, d'après ces auteurs, les îlots ayant une superficie de 0,5 à 1,5 ha seraient, semble-t-il, les plus productifs.

Étant donné les quantités relativement faibles de matériaux disponibles dans le lac Saint-Pierre, en comparaison avec d'autres aménagements réalisés aux Etats-Unis, nous estimons qu'un îlot devrait avoir une superficie habitable de 80 m de diamètre (soit 0,6 ha). Idéalement, on considère que le marais devrait avoir une superficie au moins égale à celle de l'îlot afin de permettre une utilisation optimale par la faune. Conséquemment, la superficie du marais sera également de 0,6 ha. D'autre part, étant donné que le haut-fond n'a pas d'exigence particulière et afin de permettre une comparaison de chaque type d'aménagement, sa superficie retenue sera également de 0,6 ha. Il faut noter cependant que cette superficie de départ pourra être modifiée à volonté selon la quantité de sédiments à disposer puisque la valeur de 0,6 ha est plus une référence qu'une règle à respecter.

3.2.3 Forme. - La forme d'un îlot ne présente aucune attraction particulière pour la faune et son occupation est tout à fait indépendante de sa configuration externe. Le contour d'un îlot a, par contre, une certaine importance sur le coût des travaux lorsqu'il s'agit de le ceinturer d'une structure de protection en enrochement. Dans ce cas, la forme ronde est la plus avantageuse car elle présente la plus courte périphérie pour une surface donnée et nécessite moins de matériaux.

Une autre forme a également été retenue pour l'îlot. Il s'agit de la forme atoll ouvert d'un côté, un peu comme un fer à cheval. Les considérations suivantes nous ont amenés à retenir cette configuration comme forme possible pour nos îlots. Il faut d'abord expliquer que ce type d'îlot a été imaginé pour être implanté aux endroits où le couvert de glace est instable. Ayant ensuite constaté que ces zones instables étaient assez éloignées des rives et des marais pour ne présenter qu'un attrait modéré pour la sauvagine⁴, un îlot de type atoll avec un marais au centre a alors été imaginé pour pallier cette lacune (réf. section 3.3.2). Le marais serait abrité des courants et

⁴ Il est en effet assez connu que les anatidés n'utilisent pratiquement que des îlots situés à proximité des marais lors de la saison de nidification. L'îlot sert alors à la nidification même et le marais comme aire d'élevage et d'alimentation.

éventuellement des vents par la forme extérieure en fer à cheval de son cavalier. Une ouverture à l'aval permettrait la communication entre le marais et les eaux du lac Saint-Pierre.

De manière à permettre des comparaisons plus faciles entre les différents aménagements, on a pris la forme circulaire pour le marais et le haut-fond. Cette forme ronde pourrait être facilement modifiée selon les circonstances, sans inconvénient pour la faune.

3.2.4 Pente. - La revue de littérature réalisée par Roche Ltée (1990) sur les aménagements fauniques mentionne que des îles créées à des fins d'aménagement devraient avoir idéalement des pentes très douces. De plus, de telles pentes résistent mieux à l'érosion que les pentes abruptes. Malheureusement, les volumes de sable nécessaires à la construction des structures de protection pour des pentes douces seraient trop importants. Nous avons donc opté pour un compromis consistant en des pentes d'environ $1/10^5$ pour les berges continuellement soumises aux agents érosifs et de $1/3$ pour celles au-dessous du niveau - 0,5 m.

3.3 Description des différents aménagements proposés

Les différentes propositions d'aménagement peuvent être classées en deux catégories, selon qu'elles sont destinées ou non à résister à l'action des glaces flottantes.

Dans la catégorie des aménagements résistant aux glaces flottantes, le pourtour est constitué d'une ceinture de pierre disposée en C ou en fer à cheval. Ces aménagements sont conçus spécialement pour retenir et stabiliser le couvert de glaces du chenal dans une zone de courants importants. La ceinture de pierre servira précisément à limiter les effets érosifs des glaces flottantes sur l'ouvrage. Cette catégorie comprend l'îlot en forme d'atoll avec marais et l'îlot-atoll avec marais et haut-fond.

La catégorie des aménagements destinée aux endroits où le couvert de glace est stable comprend les constructions ayant un cavalier de sable. Leur situation plus abritée ne nécessitera

⁵ Faute de théorie parfaitement adaptée au site et au type d'aménagement étudié, la pente d'équilibre a été évaluée en considérant les théories développées sur les grandes plages côtières, le diamètre des particules formant les plages de l'îlot et aussi les résultats d'observations des plages à l'île aux Sternes (à cet endroit, les pentes de $1/5$ faites de sable sont stables malgré la proximité du chenal de navigation).

pas d'enrochement coûteux car l'effet de l'érosion sera moindre. Les aménagements de cette catégorie sont l'îlot circulaire, l'îlot circulaire avec marais, l'îlot circulaire avec marais et haut-fond, le marais et le haut-fond.

Pour chacun des aménagements, la partie la plus extérieure sera constituée de sable, matériau de dragage le plus grossier disponible, donc le plus résistant aux vagues érosives (les fines particules d'un sable silteux seraient facilement emportées par les vagues).

Notons qu'une option intéressante pourrait être utilisée si ce n'était de la nature principalement argileuse du fond. Elle consisterait à excaver les matériaux grossiers nécessaires à la construction du cavalier. La cavité ainsi créée servirait à emmagasiner une quantité importante de sédiments fins, contaminés ou non, sans toutefois nécessiter un important apport de sable.

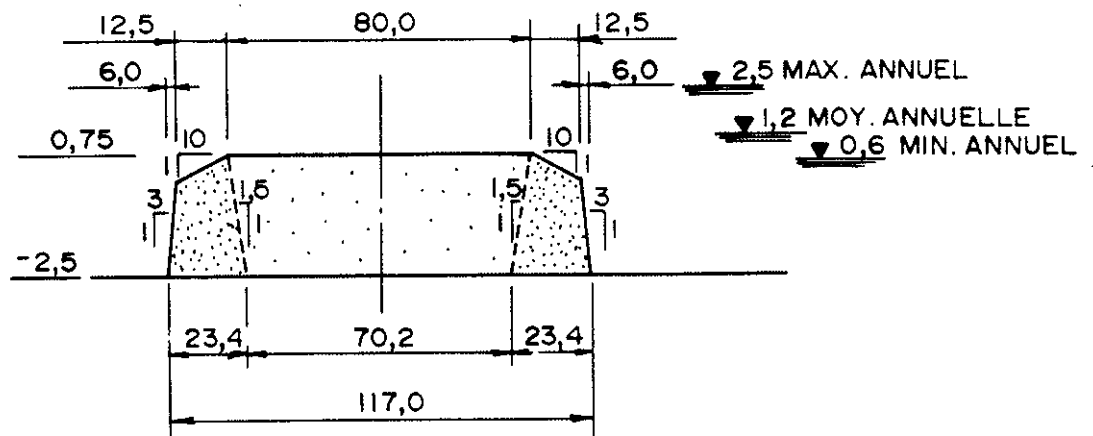
3.3.1 Catégorie d'aménagements pour couvert de glace stable

3.3.1.1 Esquisse-type d'un îlot.- Comme mentionné plus haut, l'îlot de forme circulaire devrait avoir un sommet situé à 3,5 m (avant tassement) (figure 3). Les pentes extérieures seraient de 1:3 pour la partie non soumise aux agents érosifs et de 1:10 pour le reste. L'extérieur serait constitué de sable afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

Le diamètre de la partie supérieure de l'îlot (jamais inondée) serait de 80 m, soit une superficie de 0,6 ha. Les volumes de matériaux requis pour constituer le cavalier extérieur de protection s'élèveraient à 71 600 m³ (75%) (sable d₅₀) et à 23 900 m³ (25%) pour remplir la cavité intérieure⁶ (limons ou sable, contaminés ou non) soit, au total, 95 500 m³.

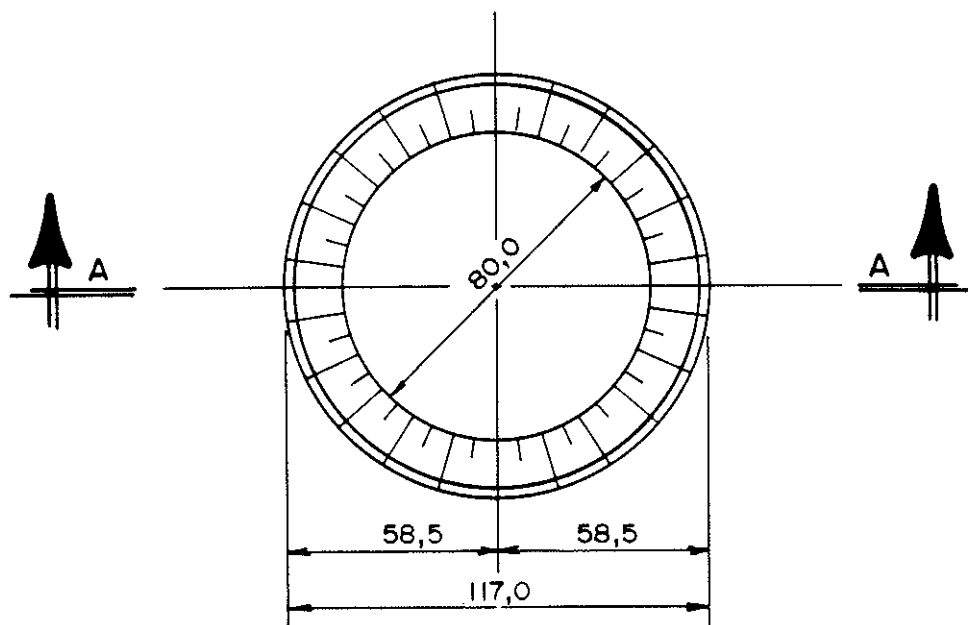
3.3.1.2 Esquisse-type d'un marais.- La cote d'élévation idéale du marais devrait être fixée à 0,75 m, soit 0,45 m sous le niveau d'eau moyen annuel (1,20 m) (figure 4).

⁶ Incluant une couche supérieure de matériaux non contaminés servant à recouvrir et à confiner les matériaux contenus dans le coeur. Cette couche est ici confondue avec les autres matériaux remplissant la cavité intérieure puisque son épaisseur, donc son volume, pourra varier selon le niveau de contamination des sédiments du coeur. Une épaisseur de 0,8 m est cependant recommandée si les matériaux sont fortement contaminés (Larson, 1989).



COUPE "A-A"

ECH. VERT. 1 : 200
HORIZ. 1 : 2000

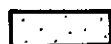


VUE EN PLAN

ECH. 1 : 2000



SABLE $d_{50} = 0,5 \text{ mm. MIN.}$



LIMONS OU SABLE A GRANULOMETRIE NON
CONTROLEE

LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Esquisse-type d'un marais

Figure 4

ROCHIE

N° de projet : 10948

Les pentes, la superficie et les matériaux seraient les mêmes que pour l'îlot ; seule l'élévation serait différente. Les volumes de sable requis s'élèveraient à 13 800 m³ (49 %) pour constituer les parois extérieures et à 14 400 m³ de sédiments à granulométrie non contrôlée (51 %) pour en remplir l'intérieur⁷, soit un total d'environ 28 200 m³.

3.3.1.3 Esquisse-type d'un haut-fond. - La cote d'élévation initiale a été fixée à - 0,5 m, de manière à assurer une hauteur d'eau de 2,0 m (par rapport au niveau moyen) après plusieurs années (figure 5). Les pentes seraient de l'ordre de 1:3 puisqu'elles ne seraient pas soumises aux agents érosifs. Les volumes requis seraient très faibles, soit 1500 m³ (14%) de sable pour les parois et 9300 m³ (86%) de matériau à granulométrie et qualité non contrôlées pour la cavité intérieure⁷, soit un total de 10 800 m³.

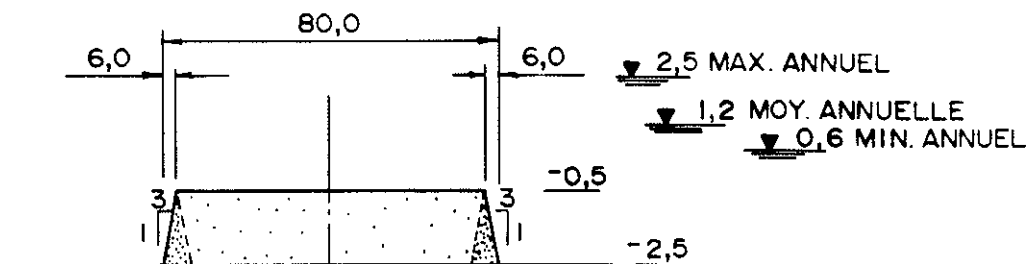
3.3.1.4 Esquisse-type d'un îlot-marais. - Ce type d'aménagement résulterait de la juxtaposition d'un îlot et d'un marais (figure 6). Les caractéristiques de chaque partie de l'aménagement (îlot, marais) seraient les mêmes que celles des aménagements pris individuellement. Le volume total de matériau requis pour la réalisation de cet aménagement serait de 116 300 m³, soit 80 900 m³ (70 %) pour les parois extérieures et 35 400 m³ (30 %) pour l'intérieur⁷.

3.3.1.5 Esquisse-type d'un îlot-marais avec haut-fond.- Cet aménagement serait le même que le précédent, auquel on juxtaposerait un haut-fond (figure 7). Il nécessiterait l'apport de 82 400 m³ (66 %) de sable pour constituer les cavaliers et de 42 500 m³ (34 %) de matériau hétérogène pour en combler la cavité intérieure, soit un total de l'ordre de 124 900 m³.

3.3.2 Catégorie d'aménagements pour couvert de glace instable

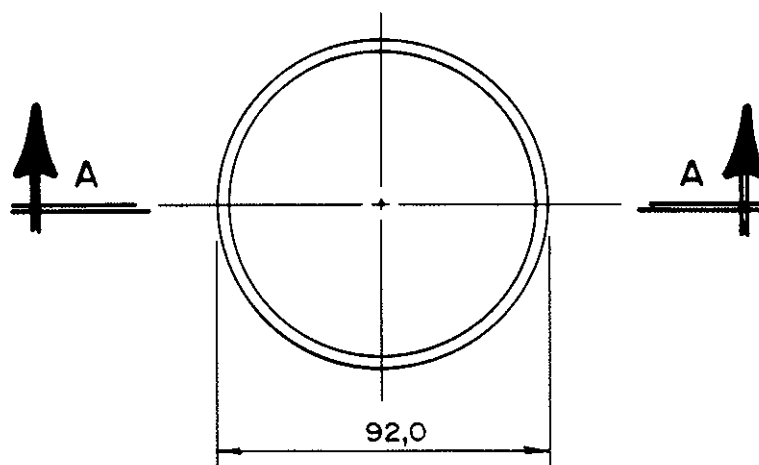
3.3.2.1 Esquisse-type d'un îlot-marais-type atoll.- Ce type d'aménagement est envisagé seulement si l'aménagement doit être situé dans un secteur de couvert de glace instable. Les parois

⁷ Voir note n° 6, page 19.



COUPE "A - A"

ECH. VERT. 1:200
HORIZ. 1:2000

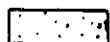


VUE EN PLAN

ECH. 1:2000



SABLE $d_{50} = 0,5\text{mm. MIN.}$



LIMONS OU SABLE A GRANULOMETRIE NON
CONTROLEE

LAC SAINT-PIERRE

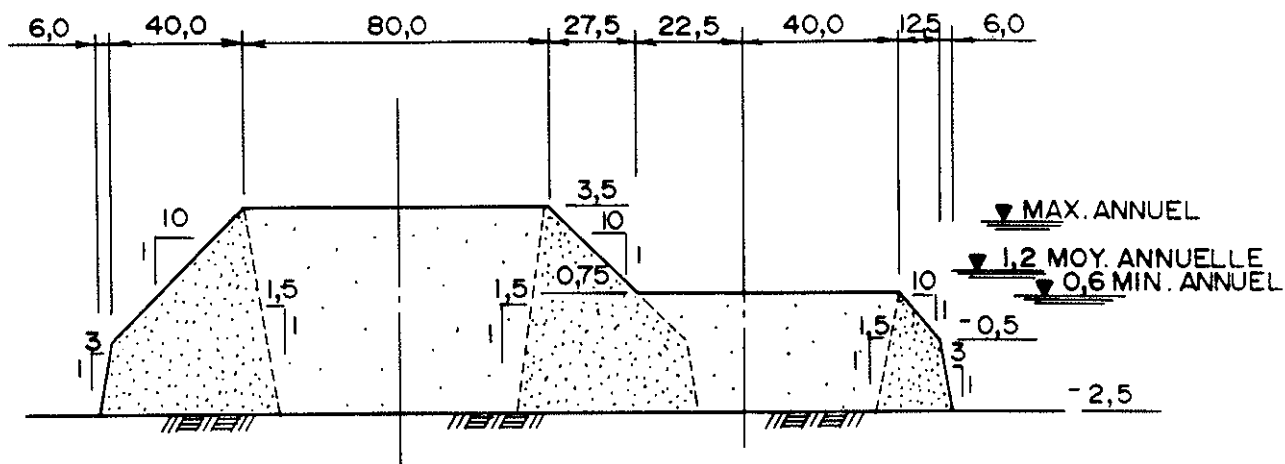
Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Esquisse-type d'un haut-fond

Figure 5

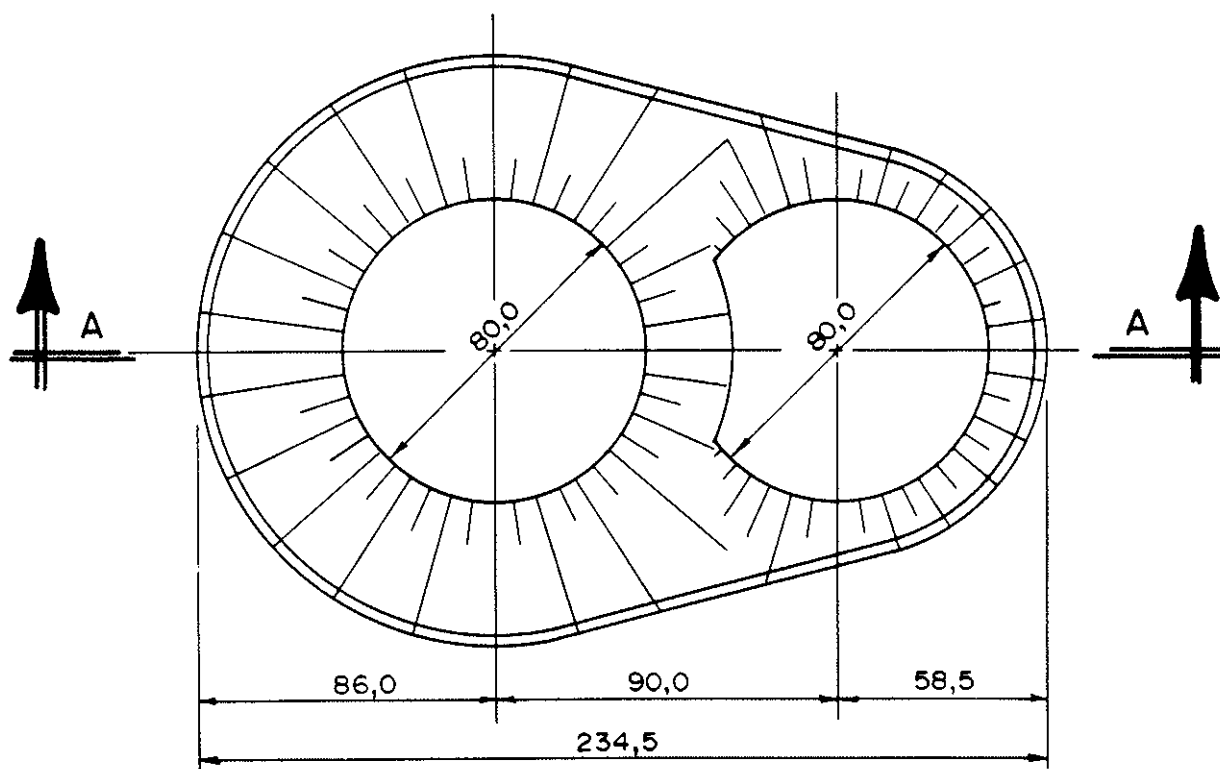
ROCHE

N° de projet : 10948



COUPE "A-A"

ECH. VERT. 1:200
HORIZ. 1:2000

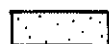


VUE EN PLAN

ECH. 1:2000



SABLE $d_{50} = 0,5\text{mm. MIN.}$



LIMONS OU SABLE A GRANULOMETRIE NON
CONTROLEE

LAC SAINT-PIERRE

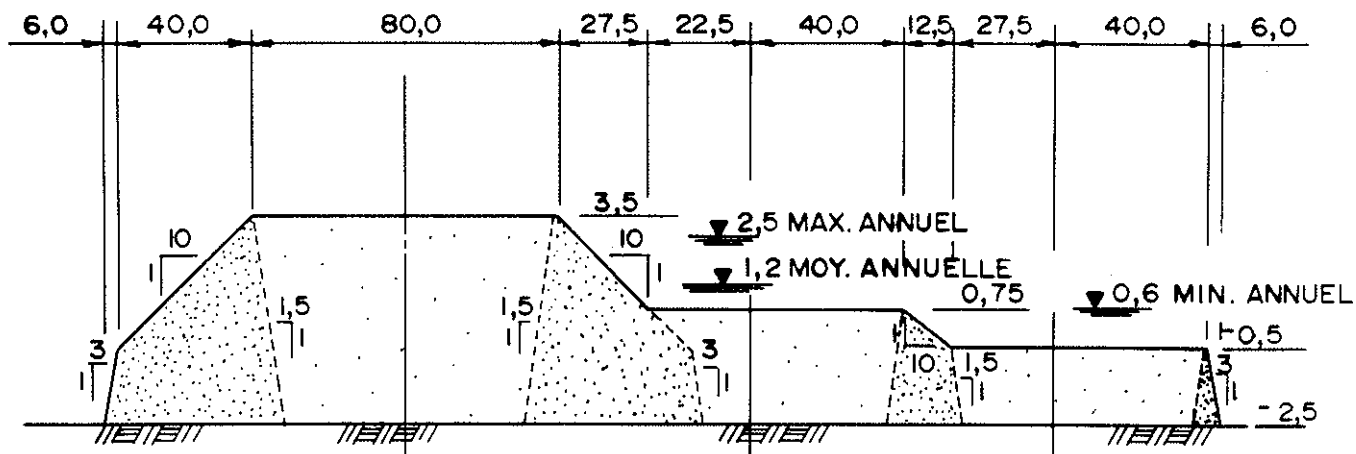
Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Esquisse-type d'un îlot-marais

Figure 6

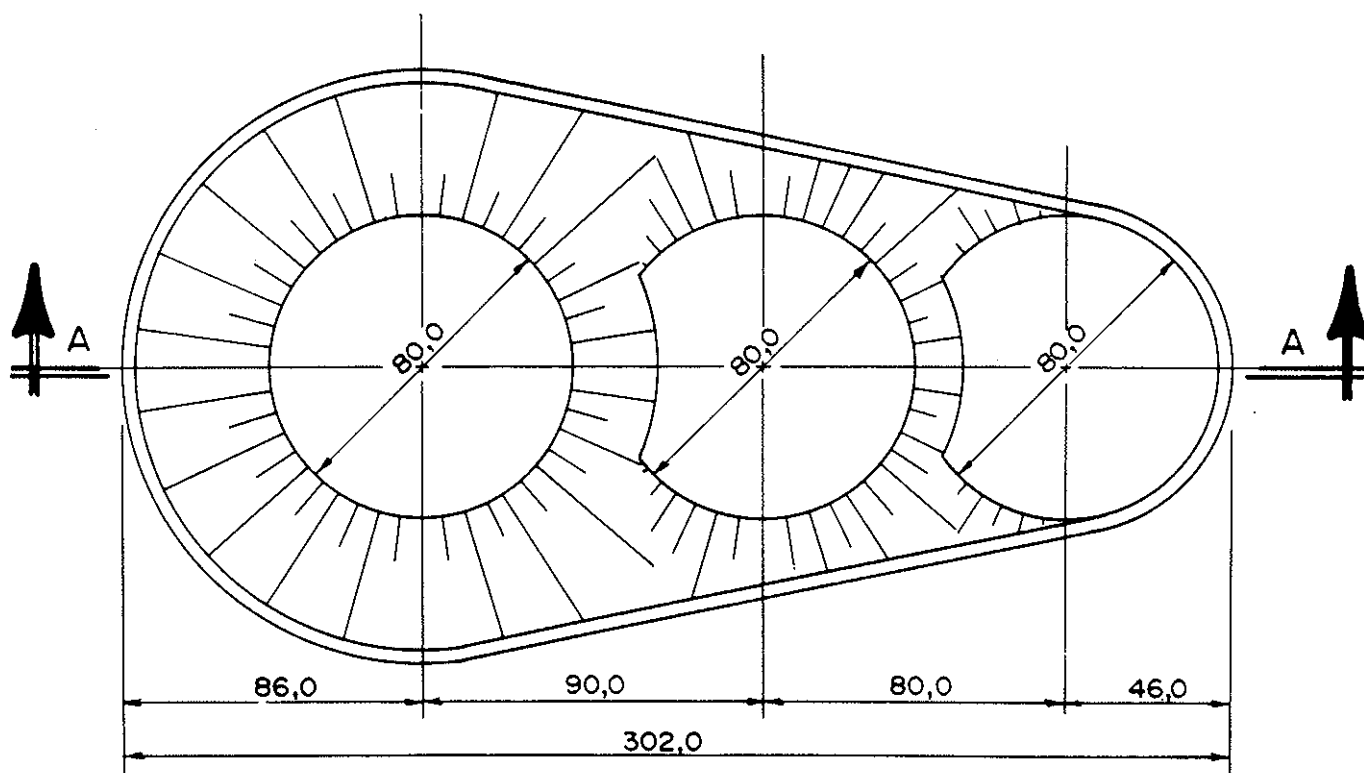
ROCHE

N° de projet : 10948



COUPE "A-A"

ECH. VERT. 1:200
HORIZ. 1:2000

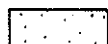


VUE EN PLAN

ECH. 1:2000



SABLE $d_{50} \geq 0,5 \text{ mm. MIN.}$



LIMONS OU SABLE A GRANULOMETRIE NON CONTROLEE

LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Esquisse-type d'un îlot-marais
avec haut-fond

Figure 7

ROCHIE

N° de projet : 10948

extérieures seraient constituées d'enrochements disposés en pente de 1:2 (pente d'équilibre). Le marais serait situé à l'intérieur de la structure en enrochement afin de le protéger des intempéries ou de l'érosion (figure 8).

Les pentes situées du côté interne seraient de 1:10. L'aménagement serait ouvert du côté opposé au courant. La surface habitable (pour la nidification) serait située en périphérie du marais, et sa superficie serait de 0,6 ha. La cote-niveau du marais serait de 0,75 m tandis que celle de l'îlot s'élèverait à 3,5 m. La superficie du marais serait de 0,7 ha.

La réalisation de cet aménagement nécessiterait l'apport de 37 500 m³ (32 %) de sable, de 80 200 m³ (68%) de matériau hétérogène⁸ et de 10 000 m³ de roches pour ceinturer l'aménagement.

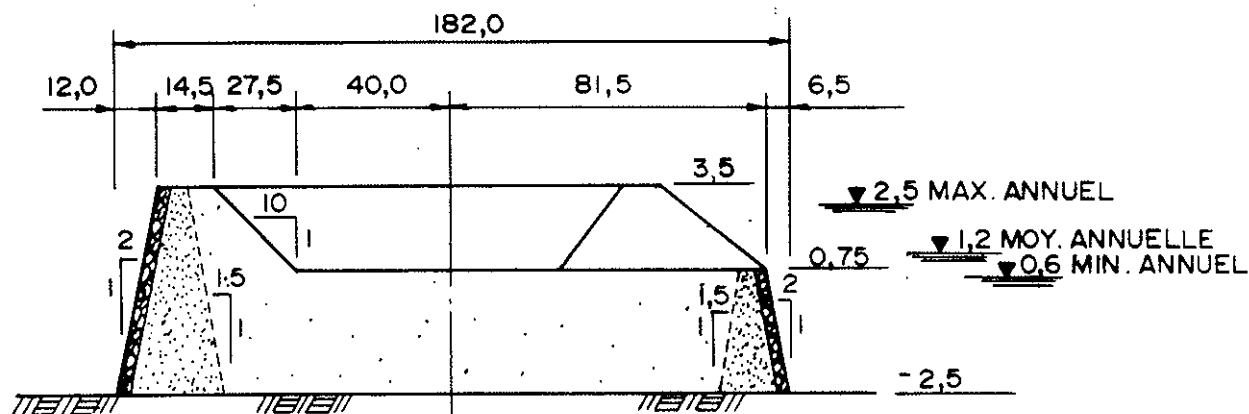
3.3.2.2 Esquisse-type d'un îlot-marais - type atoll avec haut-fond.- Cet aménagement est le même que le précédent, mais combiné avec un haut-fond du côté de l'ouverture (figure 9). Ce haut-fond serait ceinturé d'enrochement en pente de 1:2 jusqu'à la cote-niveau de - 0,5 m. La pente entre le haut-fond et le marais serait de l'ordre de 1:10. Cet aménagement nécessiterait 10 000 m³ de roches pour consolider le pourtour extérieur, 39 900 m³ (31 %) de sable (d_{50}) pour le cavalier et 89 500 m³ (69%) de sable silteux pour remplir la cavité intérieure⁸.

3.4 Évaluation des différents aménagements proposés

L'aménagement qui fera l'objet du projet pilote devra permettre de respecter les objectifs suivants :

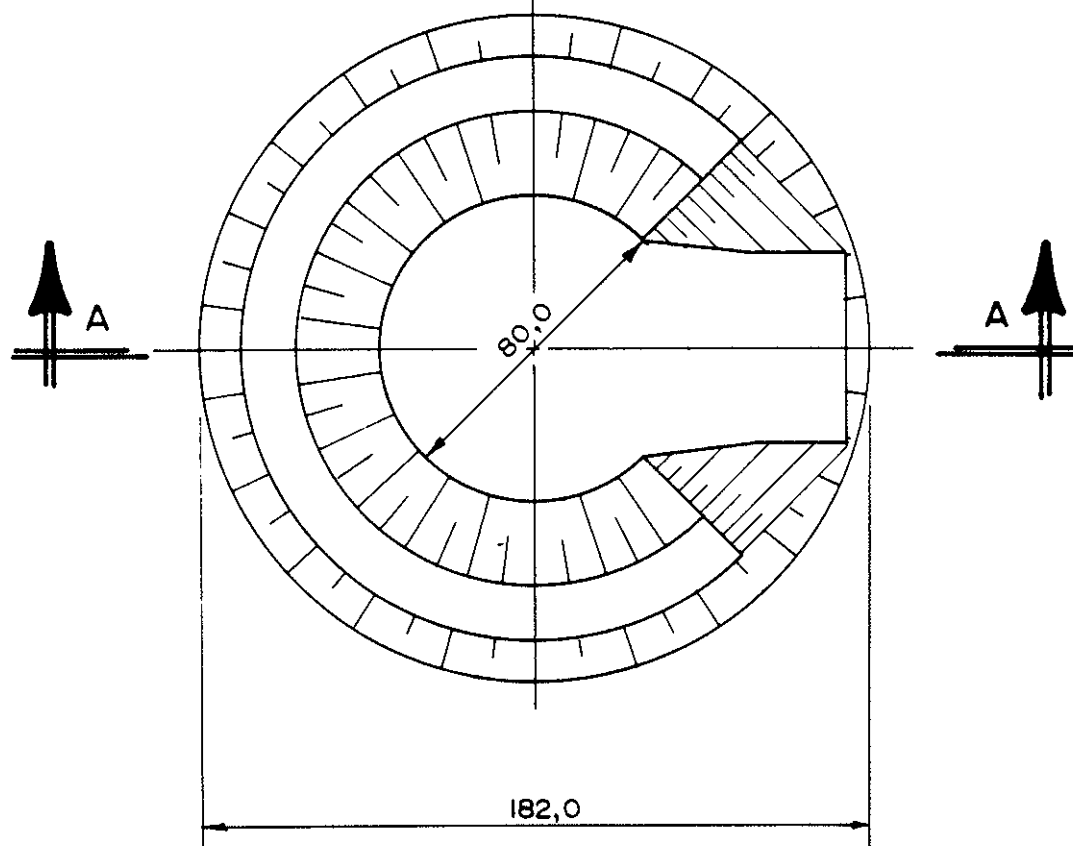
- a) confinement des 30 000 m³ de matériaux contaminés du Port de Sorel ;
- b) disposition des matériaux dragués au lac Saint-Pierre, incluant les 15 000 m³ de sable dragués annuellement et les 90 000 m³ de sable silteux (ancrage et talus) dragués tous les 8 à 10 ans et ce, pour une période assez longue ;
- c) éventuellement, le confinement des matériaux provenant du port de Trois-Rivières, advenant l'implication des autorités de celui-ci dans le projet.

⁸ Voir note n° 6, page 19.



COUPE "A - A"

ECH. VERT. 1:200
HORIZ. 1:2000



VUE EN PLAN

ECH. 1:2000



SABLE $d_{50} = 0,5\text{mm. MIN.}$



LIMONS OU SABLE A GRANULOMETRIE NON CONTROLEE

LAC SAINT-PIERRE

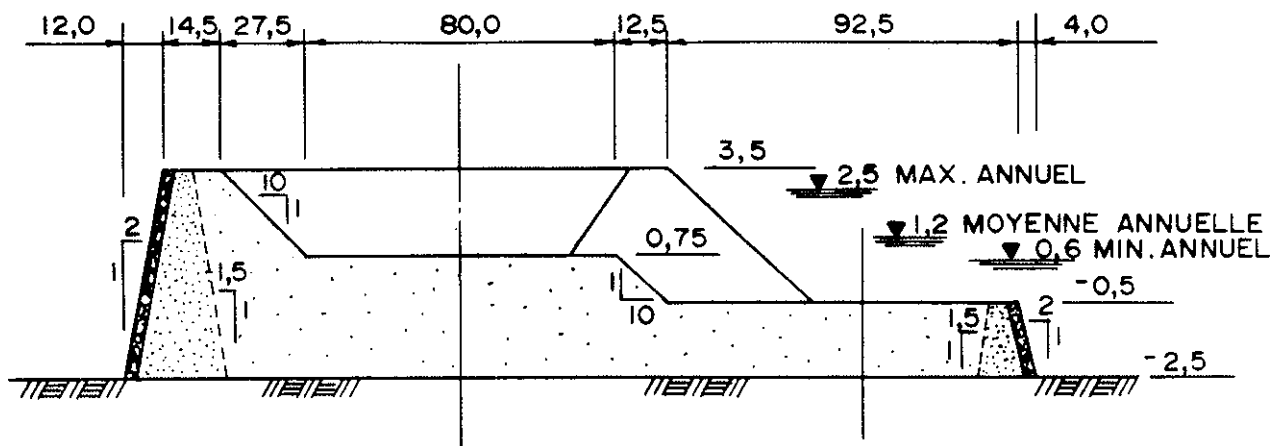
Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Esquisse-type d'un îlot-
marais-type atoll

Figure 8

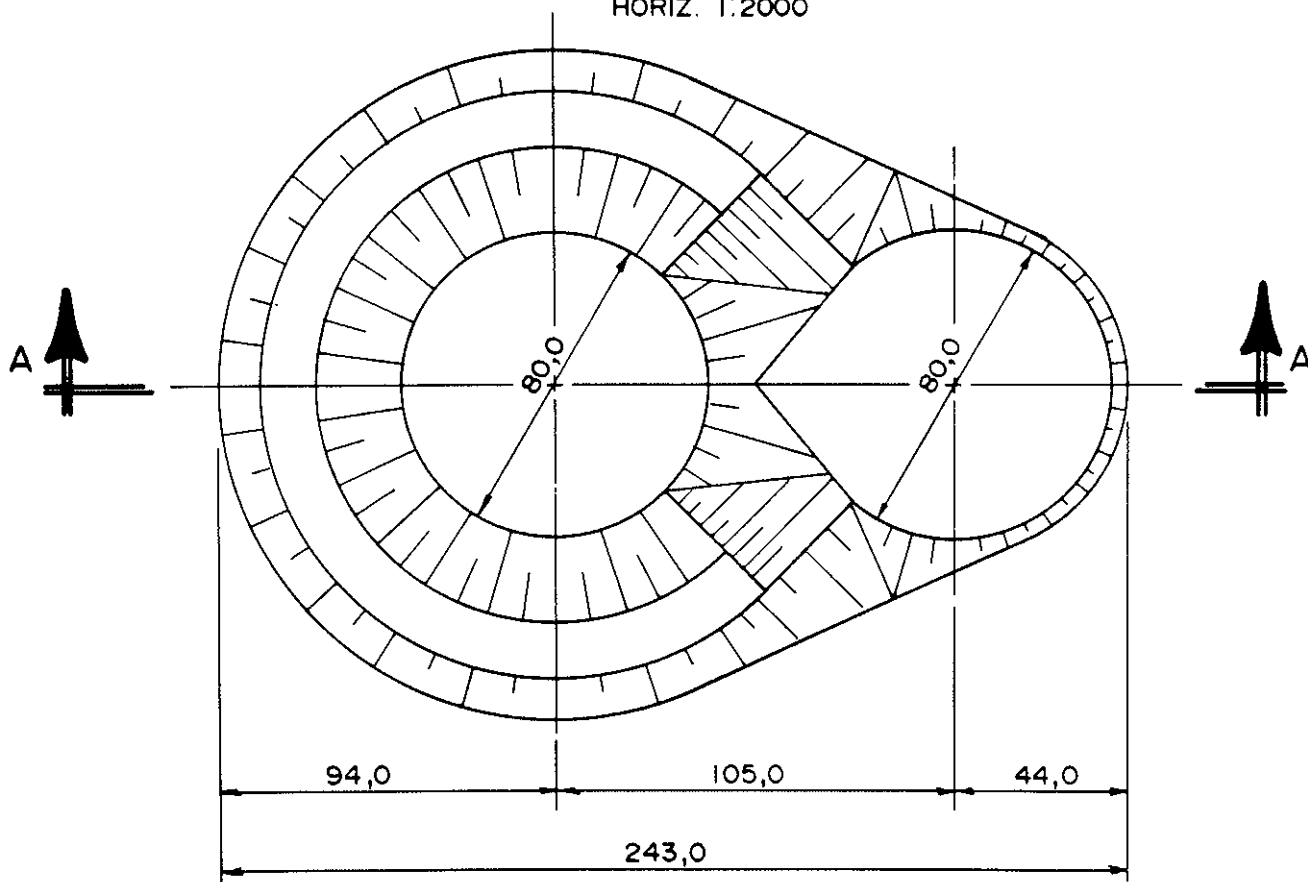
ROCHE

N° de projet : 10948



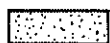
COUPE "A-A"

ECH. VERT. 1:200
HORIZ. 1:2000

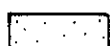


VUE EN PLAN

ECH. 1:2000



SABLE $d_{50} = 0,5\text{mm MIN.}$



LIMONS OU SABLE A GRANULOMETRIE NON
CONTROLEE

LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Esquisse-type d'un îlot-marais
-type atoll avec haut-fond

Figure 9

ROCHÉ

N° de projet : 10948

- d) utilisation polyfonctionnelle par la faune ichthyenne et avienne (migration, nidification ou fraie, élevage) ;
- e) stabilisation du couvert de glace, si possible. Le respect de cet objectif est cependant moins impératif que les autres.

3.4.1 Résultats de l'évaluation.- Des études ont déjà démontré qu'un minimum de quatre îlots-atolls seraient requis pour retenir le couvert de glace. Etant donné la quantité de matériaux disponible chaque année et la quantité nécessaire à la construction d'un seul de ces îlots ($128\ 000\text{ m}^3$), la réalisation d'un tel aménagement durerait au moins cinq ans par îlot, soit 20 ans au total, avant de pouvoir atteindre l'objectif de stabilisation du couvert de glace. La construction d'un îlot-atoll avec marais et haut-fond ($139\ 000\text{ m}^3$) serait encore plus longue.

De plus, les roches nécessaires à la réalisation de ce type d'aménagement ne sont pas nécessairement disponibles à proximité et leur transport éventuel, tant par camion que par barge, entraînerait des coûts très élevés. Pour ces raisons, cette famille d'aménagement n'a pas été retenue pour le projet pilote.

Le marais ou le haut-fond ne permettraient pas d'emmagasiner une quantité suffisante de matériaux si l'on conservait la superficie de 0,6 ha. Il faudrait augmenter la superficie du marais jusqu'à 1,5 ha (soit 115 m de diamètre) et celle du haut-fond jusqu'à 2 ha (soit 143 m de diamètre) avant que chacun puisse contenir les $30\ 000\text{ m}^3$ de sédiments contaminés de Sorel. Afin de disposer des sédiments dragués dans la voie maritime, la taille devrait augmenter encore jusqu'à atteindre rapidement des proportions très importantes (7,8 ha ou 280 m de diamètre pour le marais et 14 ha ou 385 m de diamètre pour le haut-fond. A cause de leur taille, ces aménagements ont été rejetés, même s'ils étaient théoriquement réalisables.

Quant à l'îlot, il offrirait une bonne capacité de réception des matériaux dragués, soit $95\ 000\text{ m}^3$. Cependant, tel qu'il est conçu, il ne pourrait recevoir tous les matériaux contaminés. Un léger agrandissement, jusqu'à un diamètre de 90 m (0,8 ha), permettrait d'augmenter suffisamment sa capacité, mais ces matériaux ne pourraient pas être déposés avant six ans en raison des $80\ 600\text{ m}^3$ de sable nécessaires pour contruire les cavaliers ($15\ 000\text{ m}^3$ par année). D'autre part, on ne pourrait pas disposer totalement des sables silteux en provenance des talus et de l'ancrage en raison du manque de sable pour construire les cavaliers requis. Finalement,

pour que cet aménagement soit profitable à la faune avienne, il doit être localisé à proximité d'un marais afin d'assurer son utilisation comme aire d'élevage des canetons, ce qui apparaît restrictif.

Les aménagements de types îlot-marais ou îlot-marais avec haut-fond nécessitent sensiblement les mêmes quantités de matériaux pour leur réalisation soit 116 000 et 125 000 m³ respectivement. Ils offrent tous deux une capacité suffisante pour les matériaux contaminés de Sorel (35 000 et 42 000 m³). Ces matériaux pourraient être entreposés dans le marais ou le haut-fond dès la première ou la seconde année, en raison des faibles quantités de sables nécessaires, soit respectivement 19 800 et 2700 m³. Mais l'avantage principal de ce type de construction est sa grande flexibilité dans la capacité de stockage des matériaux. En augmentant ou en diminuant la taille du marais ou du haut-fond par rapport aux autres parties, il devient très facile de s'ajuster aux volumes de sédiments disponibles. De ce point de vue, l'îlot-marais avec haut-fond est réellement le plus avantageux. De plus, par rapport aux aménagements de base pris isolément, la combinaison d'un marais et d'un îlot favorise au maximum le potentiel d'habitat pour la faune avienne et ichtyenne. L'aménagement îlot-marais avec haut-fond surpasse l'îlot-marais à ce niveau.

L'îlot-marais avec haut-fond semble être l'aménagement qui répond le mieux à tous les objectifs, sauf à celui de rétention du couvert de glace. Comme ce dernier objectif n'est pas prioritaire, c'est ce type d'aménagement qui a été retenu pour le projet pilote.

3.5 Localisation de l'aménagement retenu.- L'analyse comparative effectuée à la section précédente a démontré que l'îlot-marais avec haut-fond constituait l'aménagement répondant le mieux aux objectifs visés par le projet pilote d'aménagement faunique. Afin d'assurer la pérennité de l'aménagement et son utilisation par la faune, afin également de réduire le plus possible l'impact sur l'environnement (c'est-à-dire afin de créer un gain net d'habitat), l'emplacement de l'aménagement doit être choisi avec soin.

La première étape dans le choix de l'emplacement consistait à déterminer le ou les secteur(s) le(s) plus propice(s) à assurer la pérennité de l'aménagement en fonction du couvert de glace. En effet, comme il ne sera protégé que par un cavalier en sable, il devra être localisé dans un secteur où le couvert de glace est assez stable. Dans un deuxième temps, l'examen des

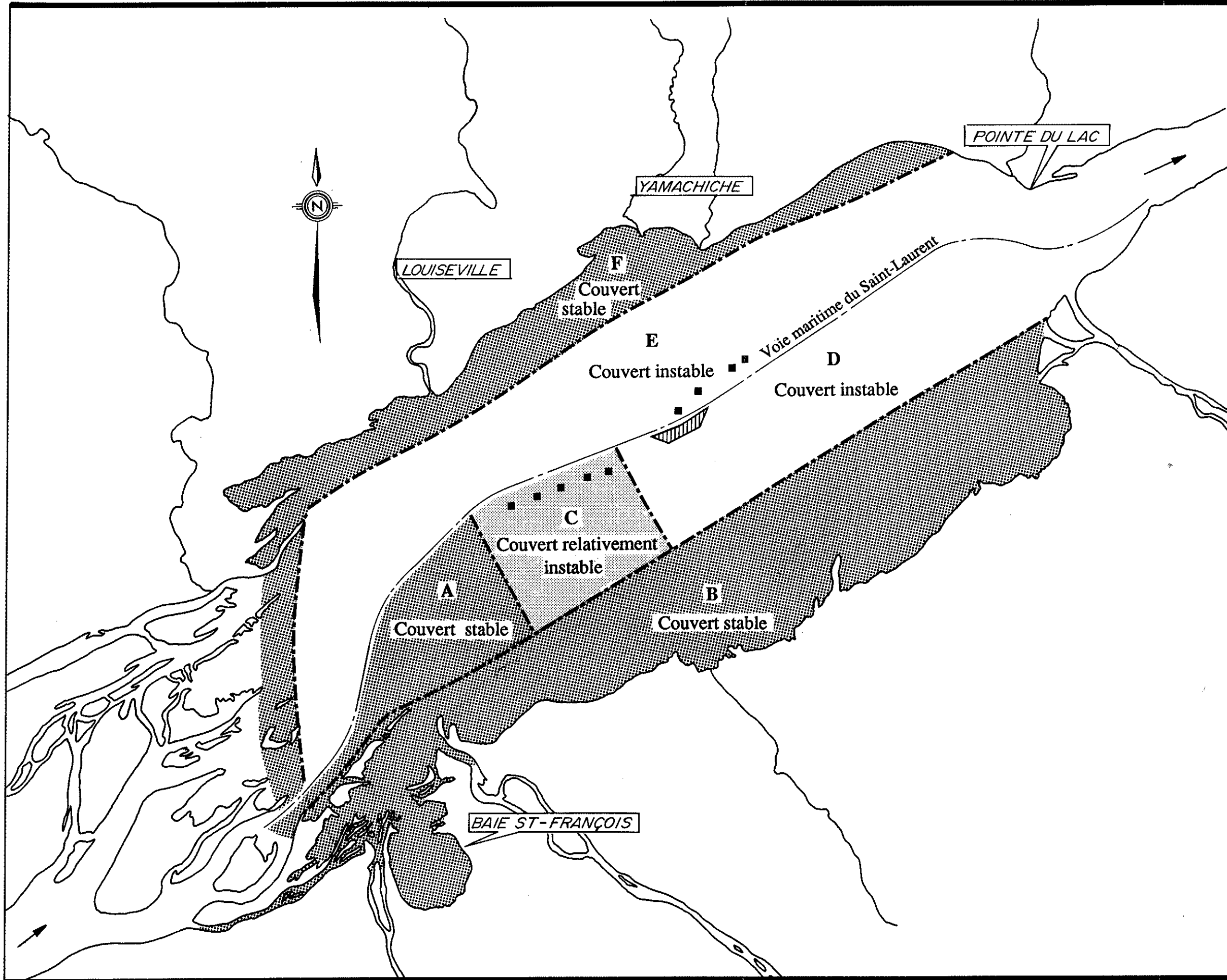
cartes bathymétriques récentes à l'échelle 1:20 000 du secteur choisi a permis de circonscrire quelques emplacements potentiels en fonction des critères énumérés plus bas. Finalement, la comparaison de ces sites en fonction de leur faisabilité technique et environnementale a permis de choisir l'emplacement où sera réalisé le projet pilote. Les paragraphes qui suivent décrivent chacune de ces trois étapes.

3.5.1 Détermination du secteur préférable.- Le lac Saint-Pierre peut être divisé en six secteurs selon la stabilité du couvert de glace. Ces secteurs ont été définis à partir de l'examen des cartes de glace qu'on retrouve dans Michel (1988). La carte 2 situe ces secteurs, qui sont caractérisés comme suit :

- un couvert de batture très stable au sud (secteur B) et au nord (secteur F) du lac Saint-Pierre. La zone sud est délimitée par une ligne joignant la pointe des îlets Percés et la pointe de l'île Moras (embouchure de la rivière Nicolet) ;
- un couvert relativement stable du côté sud du chenal commercial s'étendant depuis la tête du lac jusqu'à l'ancrage Yamachiche. La partie amont de cette zone (secteur A) est cependant qualifiée de plus stable que la partie aval (secteur C) en raison de la présence des îlots de roche au centre de cette dernière zone ;
- un couvert instable au nord de la voie maritime (secteur E) ainsi que du côté sud, en aval de l'ancrage Yamachiche (secteur D). Du côté nord, où des îlots de roche ont été construits, le couvert de glace semble être un peu plus stable; cependant, ce phénomène est très local et toute la moitié nord de la voie maritime est considérée instable (depuis l'abandon des estacades).

Les secteurs préférables pour la construction de l'aménagement sont les deux zones caractérisées par un couvert de batture (secteur B, au sud, et F, au nord) ainsi que le secteur A, à l'amont du lac, du côté sud, où des îlots en enrochement plus en aval stabilisent le couvert de glace.

3.5.2 Détermination des emplacements potentiels.- Les cartes bathymétriques spécifiques (1:20 000) aux trois secteurs retenus (A, B, F) ont été examinées afin de déterminer des sites potentiels pour la réalisation du projet pilote. Les emplacements (d'environ 300 m de diamètre) devaient idéalement posséder les caractéristiques suivantes :



LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

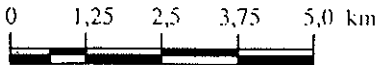
Zonation en fonction de la
stabilité du couvert de glace

- Îlots
- ▨ Ancrage Yamachiche

ROCHE

N° de projet : 10948

Échelle 1 : 125 000



- être protégés naturellement (par des hauts-fonds) des vagues de batillage provenant du chenal maritime ou être situés à au moins 1,5 km du chenal de navigation ;
- être protégés naturellement (par des hauts-fonds) des vagues de vent du nord-est (fetch maximal) ;
- offrir une profondeur supérieure à 2,0 m (sous le zéro des cartes) afin de pouvoir confiner au moins les 30 000 m³ de matériaux contaminés du port de Sorel et éventuellement ceux du port de Trois-Rivières entièrement sous le niveau de l'eau, à une profondeur suffisante pour que l'effet érosif des vagues et des glaces soit négligeable ;
- être facilement accessibles par barge afin de faciliter les travaux de construction.

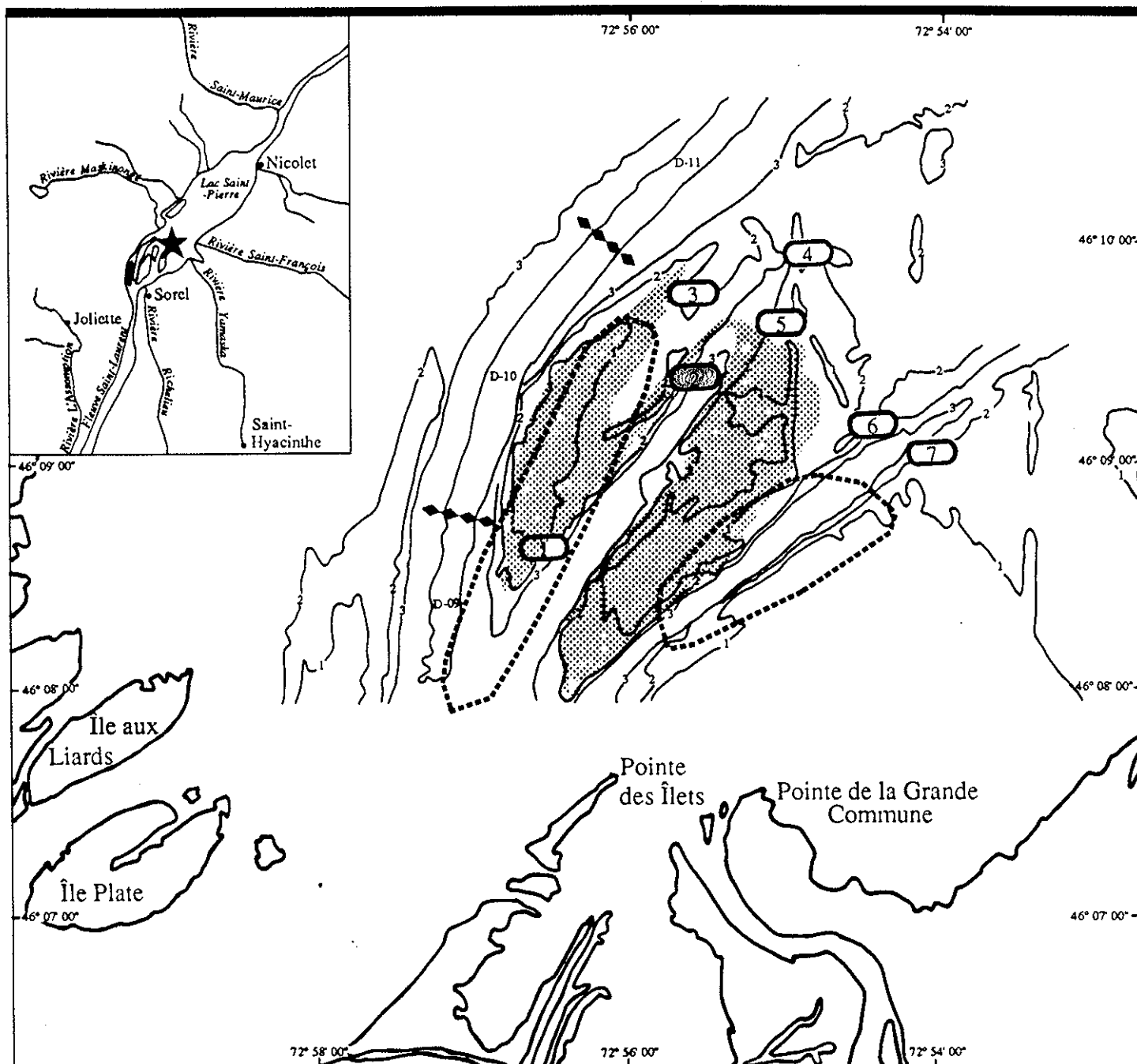
De cette analyse, sept sites préliminaires ont été retenus. Ils sont localisés dans le secteur A (carte 3). Aucun emplacement n'a été retenu dans les secteurs B et F en raison des faibles profondeurs (<2,0 m) caractérisant ces zones et de leur grande valeur pour la faune).

3.5.3 Comparaison des emplacements potentiels

3.5.3.1 Facteurs considérés.- L'analyse comparative des sept emplacements potentiels tient compte des critères suivants : facilité d'accès par les transporteurs; distance des zones de dragage; qualité de la protection naturelle des emplacements; impacts environnementaux potentiels.

Facilité d'accès.- La facilité avec laquelle la barge pourra s'approcher du site dépend principalement du tirant d'eau disponible aux alentours. Une profondeur limitée ou un haut-fond obligera la barge à faire un détour ou à restreindre son chargement à chaque voyage. Dans chaque cas, le trajet supplémentaire impliquera des coûts additionnels.

Distance des zones de dragage.- Les zones de dragage considérées sont, à l'amont du lac, le port de Sorel (où 30 000 m³ de matériau contaminé seront dragués ; ce dragage n'aura lieu qu'une fois au début du projet) et le secteur D-13 (courbe No 2 - Yamachiche) du chenal maritime, considéré comme étant l'épicentre des travaux de dragage effectués régulièrement par la Garde côtière. Idéalement, le site devrait se trouver le plus près possible du secteur D-13 et, en second lieu, le plus près possible du port de Sorel.



① Emplacement potentiel

— Isobathes (m)

Zone de concentration de canards plongeurs

Zone de pêche sportive

Section de sondage

★ Secteur d'intervention

LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

Localisation des emplacements
potentiels

Carte 3

ROCHE

N° de projet : 10948

Échelle 1: 50 000

1 0,5 0 1km



Protection naturelle des emplacements.- La protection naturelle fait référence à la présence de hauts-fonds entre l'emplacement choisi et le chenal de navigation ; ces hauts-fonds contribueraient à atténuer l'effet des vagues de batillage causées par le passage des navires. De plus, la distance entre l'emplacement et la voie maritime a également été considérée. Il semble en effet qu'en l'absence de protection naturelle, les vagues de batillage soient suffisamment atténuées après avoir parcouru 1,5 km pour ne plus avoir d'effet important (Bélangier et al. 1989). D'autre part, la protection des vagues de vent de direction nord-est a également été considérée.

Impacts environnementaux potentiels.- En ce qui concerne les impacts environnementaux potentiels, l'étude de Hamel, Beaulieu & Ass (1989) a été utilisée afin de discerner les aspects susceptibles d'être touchés par un aménagement dans un endroit donné. Tous les éléments des milieux biologique et humain illustrés sur les cartes d'inventaire ont été examinés.

3.5.3.2 Analyse et choix.- Le tableau 2 résume, pour chacun des emplacements potentiels, les caractéristiques qui serviront à la comparaison.

Idéalement, l'emplacement choisi devrait être bien protégé par des hauts-fonds et/ou se situer à une distance d'au moins 1,5 km de la voie maritime ; engendrer le moins d'impact possible sur l'environnement ; être facilement accessible par barge à pleine charge ; se situer un peu plus près du secteur D-13 de la voie maritime que de Sorel (puisque les volumes sont plus importants dans la voie maritime, du moins à long terme.

Protection naturelle.- Tous les emplacements proposés sont bien protégés des vagues de batillage, soit par la présence de hauts-fonds, soit en raison de l'éloignement par rapport à la voie maritime (distance supérieure à 1,5 km). Les emplacements 3, 4 et 6 sont cependant moins bien protégés des vagues de vent en provenance du nord-est que les autres sites. En tenant compte du facteur "protection naturelle", les emplacements 1, 2, 5 et 7 seraient préférables.

Impacts potentiels sur l'environnement.- Les emplacements 3 et 4 créeraient le moins d'impact sur l'environnement bien que les sites 2 et 5 soient également intéressants de ce point de vue

TABEAU 2 Caractéristiques des emplacements potentiels.

Site	Facilité d'accès	Distance des zones de dragage		Protection naturelle	Impact potentiel sur l'environnement
		Sorel (km)	D-13 (km)*		
1	Facile	18,6	9,9	Très bien protégé (1-2)	Se situe dans une zone de pêche sportive et une zone très utilisée par les canards plongeurs
2	Facile	20,0	14,2	Très bien protégé (1-2)	Se situe dans une zone très utilisée par les canards plongeurs
3	Moyen	21,9	6,5	Bien protégé (1)	Se situe très près d'une zone très utilisée par les canards plongeurs
4	Moyen	22,4	7,0	Bien protégé (1)	Se situe à proximité d'une zone très utilisée par les canards plongeurs
5	Moyen	20,7	14,9	Très bien protégé (1-2)	Se situe dans une zone très utilisée par les canards plongeurs
6	Facile	20,7	15,7	Bien protégé (1)	Se situe à proximité d'une zone très utilisée par les canards plongeurs et d'une zone de pêche sportive
7	Facile	21,0	16,0	Très bien protégé (1-2)	Se situe à proximité d'une zone de pêche sportive

* Ajouter 31 km en barge pour obtenir la distance de Trois-Rivières.

(1) Protection des vagues de batillage

(2) Protection des vagues de vent (direction dominante : nord-est)

puisque'ils ne touchent que faiblement à l'habitat des canards plongeurs. Malgré que les emplacements 6 et 7 ne touchent pas directement à des milieux utilisés par la faune ou la communauté riveraine, le transport des matériaux par barge lors de la construction pourrait perturber la pêche sportive plus en amont ou modifier l'habitat de la carpe. Finalement, le site 1 est le plus désavantagé puisqu'il se situe à la fois dans une zone de pêche sportive et dans une zone très utilisée par les canards plongeurs.

Globalement, selon des considérations environnementales, les emplacements 3 et 4, puis les sites 2 et 5 seraient préférables.

Facilité d'accès par les transporteurs.- Les sites 3, 4 et 5 pourraient présenter quelques restrictions d'accessibilité pour une barge chargée à pleine capacité. Selon l'époque de l'année, le tirant d'eau pourrait limiter le chargement à chaque voyage. Les autres sites ne présentent pas de difficulté de ce genre.

Distance des zones de dragage.- Les sept emplacements proposés se situent plus près du secteur D-13 que de Sorel. L'emplacement 1 est le plus près de Sorel tandis que les emplacements 3 et 4 puis le site 1 sont les plus près du secteur D-13. Les autres emplacements constituent des compromis entre les deux zones à draguer. Du point de vue distance, les emplacements 1, 3 et 4 seraient les meilleurs.

Choix de l'emplacement.- Tous les emplacements étudiés se prêtent assez bien à la réalisation du projet. Cependant, c'est le site 2 qui, globalement, offre le plus d'avantages. Il est très bien protégés des vagues, tant de vent que de batillage ; il est facilement accessible par barge sans restriction particulière et est un compromis acceptable entre les distances jusqu'aux deux principales zones à draguer. Il faut néanmoins noter que ce choix est loin d'être définitif et qu'il pourra être changé d'après les résultats et conclusions des études complémentaires (principalement celle ayant trait aux vagues et courants ; voir section 4.4) qui devront être menées avant le démarrage des travaux. Notre choix du site 2 n'est qu'une proposition découlant d'une analyse succincte.

Advenant le cas où ce site ne pourrait être retenu, après des études plus détaillées, les emplacements 1 et 7 pourraient s'avérer des alternatives intéressantes.

4. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU PROJET RETENU

4.1 Plan d'ensemble et mode de réalisation

Le projet d'aménagement illustré à la figure 10 a été conçu de manière à pouvoir retenir les 30 000 m³ de matériaux contaminés du port de Sorel ainsi que ceux provenant de l'entretien du chenal de navigation pendant les huit prochaines années⁹. Nous avons présumé que le dragage du talus et de l'ancrage (matériaux fins) aurait lieu en 1997 et 1998 respectivement. Entre temps, un volume de 15 000 m³ de sable devrait être disponible annuellement. Il est à noter que les matériaux en provenance de Trois-Rivières n'ont pas été inclus dans le design mais pourraient facilement être intégrés au projet avec des modifications mineures.

Il est entendu que la forme et la dimension finale de l'ouvrage seront définies à l'étape des plans et devis, une fois la caractérisation du site et des matériaux terminée. L'aménagement proposé doit donc être vu comme un concept général plutôt que comme un projet définitif.

L'aménagement proposé pourra être construit en trois étapes distinctes. Etant donné les faibles volumes disponibles (15 000 m³ par an), chaque étape s'échelonnera sur plus d'un an.

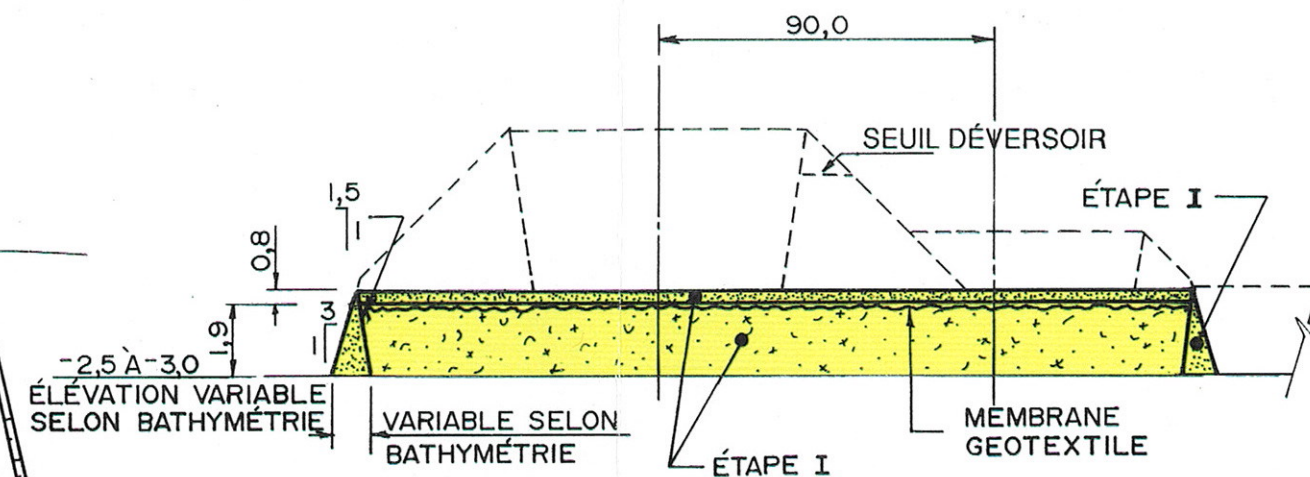
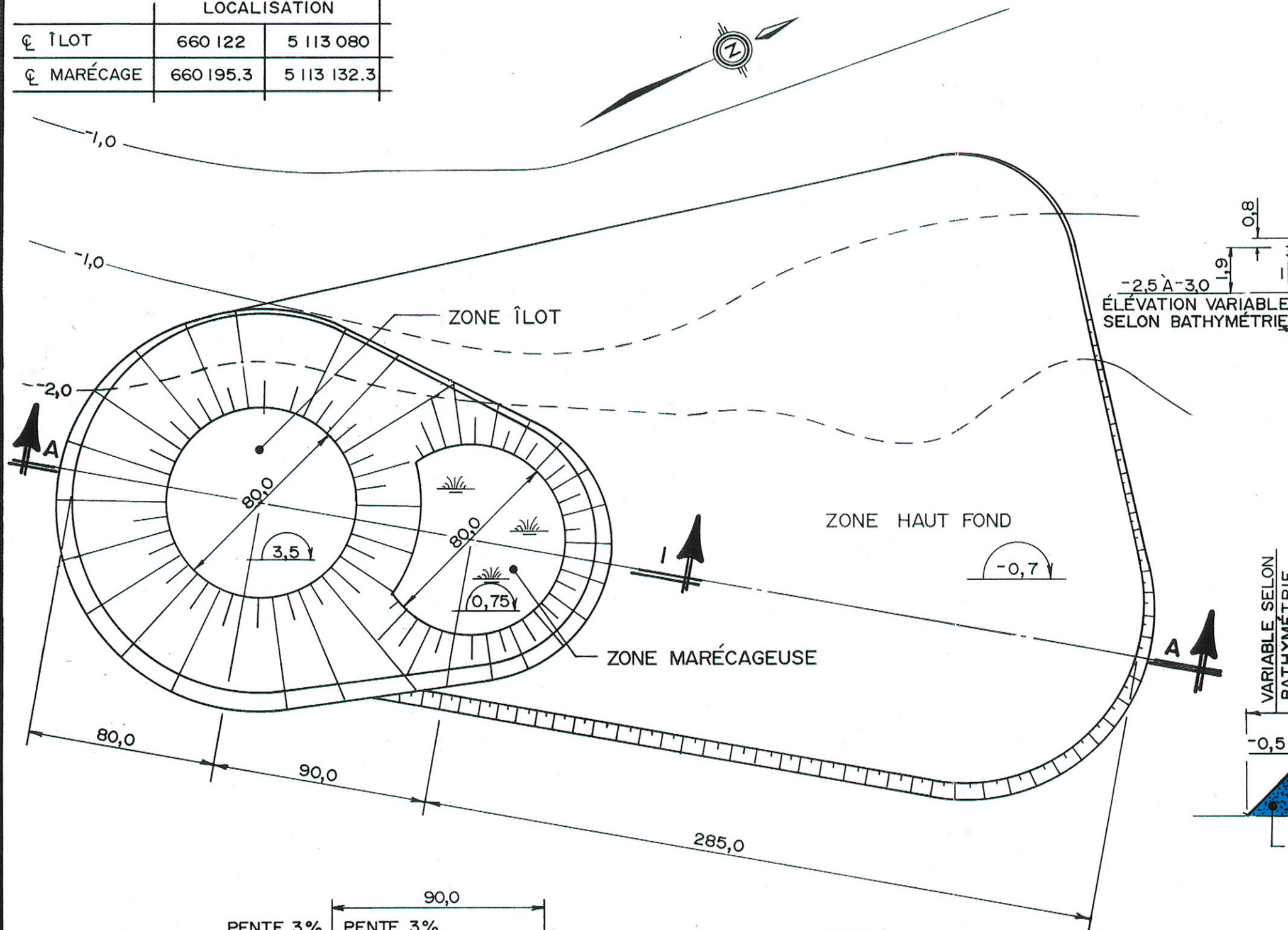
4.1.1 Etape 1.- La première étape consiste à construire le haut-fond qui servira d'assise à l'îlot et au marais.

La dimension de l'assise a été déterminée de manière à offrir une capacité de stockage suffisante pour entreposer 30 000 m³ de matériaux contaminés en provenance du port de Sorel. Les volumes précis de sédiments à confiner devront cependant être déterminés avant l'élaboration des plans et devis.

Le cavalier de l'assise sera construit avec du sable en provenance de l'entretien du chenal. Les pentes extérieure et intérieure du cavalier seront de 1:3. Environ 11 000 m³ de matériaux seront nécessaires à la construction du cavalier ; le sable supplémentaire pourra être rejeté à

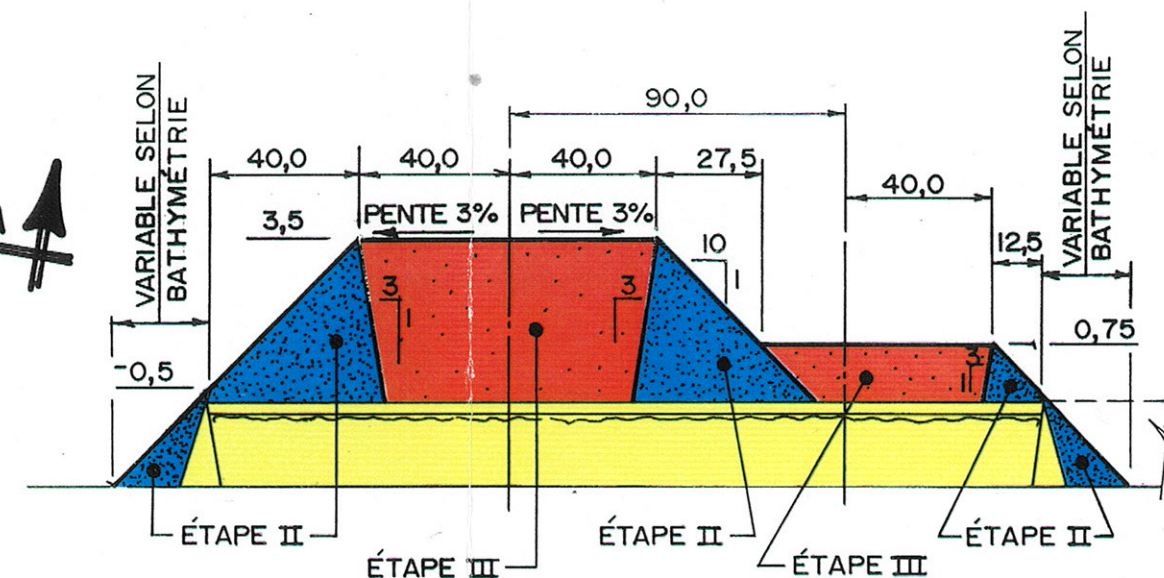
⁹ Les matériaux du port de Trois-Rivières pourraient être intégrés à l'ouvrage en modifiant légèrement le concept exposé ici. Ces matériaux n'ont pas été inclus dans le concept retenu puisque la participation du Port à la réalisation du projet demeure incertaine.

LOCALISATION		
☉ ÎLOT	660 122	5 113 080
☉ MARÉCAGE	660 195.3	5 113 132.3



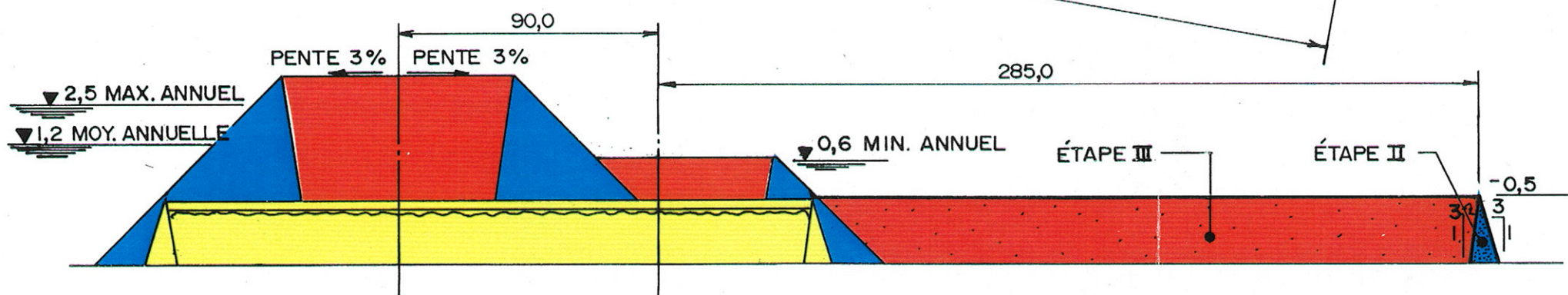
COUPE "A-I"

ÉCH. HORIZ. 1:2000
VERT. 1:200



COUPE "A-I"

ÉCH. HORIZ. 1:2000
VERT. 1:200



COUPE "A-A"

ÉCH. HORIZ. 1:2000
VERT. 1:200

-  SABLE d50 = 0,5mm. MIN.
-  LIMONS OU SABLE À GRANULOMÉTRIE NON CONTRÔLÉE
-  SÉDIMENTS CONTAMINÉS

LAC SAINT-PIERRE

Projet pilote d'aménagement faunique
à partir de déblais de dragage

ÉBAUCHE DU PLAN
D'AMÉNAGEMENT
RETENU

FIG. 10

ROCHE

N° de projet : 10948

l'intérieur de l'enceinte de manière à favoriser le drainage des eaux interstitielles du fond du lac lors de la construction du coeur de l'îlot.

L'année suivante, la construction du cavalier sera complétée ; la cote finale après tassement est de - 0,5 m. La pente extérieure du cavalier sera adoucie de manière à empêcher l'effondrement du cavalier de l'îlot qui sera construit à l'étape suivante.

Une fois la construction du cavalier terminée, les matériaux contaminés en provenance de Sorel pourront être déposés à l'intérieur de manière à former le coeur de l'assise.

Avant le dépôt, une membrane géotextile flottante annexée au cavalier et ceinturant le site pourrait être utilisée afin de réduire les pertes de sédiments contaminés lors du déversement. L'utilité d'une telle membrane pourra être examinée une fois les caractéristiques des matériaux et les conditions de courant au site mieux connues.

Lors du dépôt des matériaux, des agents stabilisants (agents hydrauliques, pouzzolaniques ou chaux) pourraient être ajoutés aux boues de dragage afin de favoriser la sédimentation des particules fines contaminées et d'accélérer la consolidation des matériaux, ce qui augmenterait leur résistance au cisaillement dès les premières années. De plus, ces agents favoriseraient la retenue des contaminants métalliques dans les dépôts stabilisés en favorisant la formation d'hydroxydes insolubles qui seront facilement adsorbés sur la surface des particules et en diminuant graduellement la perméabilité des boues contaminées. L'utilisation d'agents stabilisants pourrait donc permettre de bonifier l'aménagement. Toutefois, la faisabilité et l'utilité de ces agents ne sont pas encore suffisamment démontrés pour en recommander l'emploi immédiat. Ils devront préalablement être examinés plus en détail (voir annexe 2).

Une étude permettant de définir les gains engendrés par l'ajout d'agents stabilisants est donc recommandée, afin de démontrer que tous les aspects nécessaires à assurer la stabilité de l'ouvrage ont été évalués. Ainsi, une telle étude ne pourra que favoriser l'acceptation du projet d'aménagement par le public et les différentes agences gouvernementales. Elle pourrait être réalisée pendant les travaux préliminaires de caractérisation. Il en coûterait près de 80 000 \$. Il faut toutefois noter que l'utilisation ou non d'agents stabilisants ne devrait pas modifier la faisabilité du projet et le déroulement normal des travaux.

Les matériaux contaminés devront par la suite être recouverts d'une couche de sable d'une épaisseur d'environ 0,8 m. Cette couche de sable sera séparée des matériaux silteux par une membrane géotextile qui couvrira l'assise. Le géotextile devrait permettre de retenir le sable au-dessus de la couche d'argile.

4.1.2 Etape 2.- Lors de la seconde étape, les cavaliers de l'îlot, du marais et du haut-fond seront construits. Le cavalier du haut-fond, de même que les talus intérieurs des cavaliers du marais et de l'îlot, pourraient s'accommoder de pentes de 1:3. Les pentes extérieures de l'îlot et du marais seront cependant plus douces (1:10).

Les cavaliers de l'îlot ne pourront être surélevés que d'un mètre au maximum par année si des agents stabilisants ne sont pas utilisés lors de la première étape (dépôt des matériaux contaminés). Des tassements de l'ordre de 15 à 20 p. 100 des sols de l'assise pourraient alors être enregistrés. Par contre, si des stabilisants sont utilisés, la construction des cavaliers en une seule année sera probablement possible. Cet aspect devra cependant être vérifié plus en détail avant l'élaboration des plans finals. Les cotes respectives du haut-fond, du marais et de l'îlot après consolidation seront de - 0,5 ; 0,75 et 3,5.

Un seuil déversoir pourra être construit dans la partie aval du cavalier de l'îlot afin de contrôler l'écoulement des eaux lors du dépôt des sédiments formant le coeur de l'îlot.

4.1.3 Etape 3.- La construction du coeur de l'îlot, du marais et du haut-fond se fera lors de cette étape. Les matériaux seront alors pompés à l'intérieur des cavaliers. Il est possible que si aucun stabilisant n'est utilisé, les dépôts doivent être faits par couches d'un mètre annuellement. La stabilisation devrait cependant permettre à l'assise de recevoir des dépôts annuels plus importants.

Au total, environ 90 000 m³ de sédiments à granulométrie non contrôlée pourront être entreposés. Cette étape pourra être réalisée lors de la sixième et de la septième années.

4.2 Mise en végétation

Puisque les techniques d'implantation en milieu immergé sont très onéreuses et que la végétation aquatique colonisera vraisemblablement le site à court terme, la mise en végétation se limitera essentiellement à implanter une ou des espèces végétales déterminées et reconnues comme favorables à la faune dans la partie émergente (plus hostile à l'implantation naturelle que les zones inondées).

4.2.1 Espèce végétale retenue.- L'espèce végétale proposée pour la mise en végétation de l'îlot est le phalaris roseau (*Phalaris arundinacea*). Le phalaris est une plante indigène qui offre plusieurs avantages pour la réalisation de tels travaux d'aménagement :

- elle répond bien aux exigences d'habitat pour la sauvagine (Bélanger et al., 1989) et l'ichtyofaune (Côté et al., 1988) ;
- malgré sa préférence pour les sols humides, elle tolère des sols secs et même des sols inondés (Lefor, 1987). Si l'on considère l'enfoncement graduel de l'îlot, cette particularité d'adaptation est des plus appropriées pour la survie à long terme de la végétation implantée ;
- elle tolère très bien une grande variété de pH (de 5 à 8) ;
- elle pousse aussi bien sur les sols à texture grossière que fine ;
- en raison de son système racinaire bien développé, elle peut être considérée comme un très bon stabilisateur de sol (U.S. Army Corps of Engineer, 1978) ; elle germe et pousse rapidement : on peut donc s'attendre à un très bon recouvrement après seulement deux ans (U.S. Army Corps of Engineers, 1978) ;
- elle ne nécessite pas l'introduction de plante compagne ; elle est facilement disponible sur le marché québécois sous forme de graines.

4.2.2 Mode de plantation.- Le mode de plantation recommandé est l'ensemencement. Ce choix est basé sur les considérations suivantes :

- le marché québécois offre le phalaris roseau sous forme de graines seulement ;
- les coûts d'ensemencement sont de beaucoup inférieurs aux autres modes de plantation, que ce soit par semis, par plants en pot ou à racines nues produits commercialement, ou par plant extrait en milieu naturel ;

- les graines ont généralement des taux de germination très élevés.

4.2.3 Préparation du substrat

4.2.3.1 Amendements.- Pour chaque type de substrat, un échantillon de sol devra être soumis à un laboratoire d'analyse de manière à en établir les caractéristiques (teneur en azote, phosphore, potassium, magnésium, sels solubles, pH, etc). Etant donné que le matériau de dragage peut s'acidifier à l'air, des échantillons de sol devront être prélevés au moins six semaines après le dépôt des matériaux. Le rapport d'analyse devra présenter les amendements recommandés pour ajuster, entre autres, le pH, le N-P-K et la texture du sol. Si un amendement est nécessaire, il devra être mélangé au substrat au moins un mois avant les travaux d'ensemencement, mais de préférence l'automne. Seul le sol se trouvant au-dessus de la ligne des hautes eaux devra être amendé. Le choix de l'engrais devra être fondé sur les recommandations du laboratoire d'analyse.

Les autres données obtenues lors de l'analyse du sol permettront de mieux évaluer les résultats lors du suivi de la plantation.

4.2.4 Technique d'ensemencement.- La technique d'ensemencement préconisée est relativement simple. Cependant, les travaux devront être réalisés avec minutie afin d'assurer un taux de réussite intéressant.

Etant donné la faible superficie à semer (moins de 2 ha), les travaux devront se faire manuellement, ou à l'aide d'un semoir. Après l'ensemencement, les graines seront recouvertes d'au plus 2 cm de terre. Le sol pourra alors être humidifié jusqu'à une profondeur d'environ 150 mm avec un jet léger.

Idéalement, la surface semée sera recouverte d'un paillis tressé fait de paille séchée ou de fibre de noix de coco. Ce tapis biodégradable sera retenu au sol par des tiges d'ancrage conçues à cette fin.

4.2.5 Taux d'ensemencement.- Le taux d'ensemencement recommandé pour le *Phalaris arundinacea* est de 20 kg/ha. Ce taux tient compte du pourcentage de germination qui se situe autour de 70 p. 100 et des conditions de substrat fin moins favorable à la germination.

4.2.6 Entretien.- Jusqu'à quatre semaines après l'ensemencement, le substrat devra idéalement être maintenu à un taux d'humidité favorable à la germination et à la pousse des jeunes plants par un arrosage régulier. En août, si le sol présente des surfaces dénudées de plus d'un mètre carré, on devra réensemencer ces zones en ayant soin d'introduire auparavant un fertilisant de type 30-6-12 au taux recommandé par le fabricant. Selon la nature du substrat, une fertilisation régulière (au printemps et à l'automne) peut être nécessaire jusqu'à deux ans après l'ensemencement.

4.2.7 Période d'ensemencement.- La période optimale pour l'ensemencement se situe entre le premier mai et le 15 juin, soit après la crue printanière et une fois le sol dégelé. L'ensemencement au printemps permet d'ailleurs aux jeunes plants de bien s'enraciner avant la saison hivernale et ainsi de mieux résister aux conditions climatiques.

L'ensemencement devra être fait au moins six à huit mois après le dernier dépôt de matériau de dragage afin de s'assurer du compactage préalable du sol. Avant l'ensemencement, le compactage sera situé autour de 85 p. 100. Cette mesure est nécessaire pour assurer un bon support à la plante (surtout par les graminées), éviter les poches d'air qui favorisent la putréfaction des racines et enfin pour faciliter le travail des semeurs.

4.3 Mode de réalisation

Le dépôt des sédiments sur le fond nécessitera l'utilisation d'une barge équipée d'une grue à benne preneuse pour la plus grande partie du travail. Tant que le site sera accessible par barge, cette technique sera utilisée. Dans certaines circonstances particulières, principalement lorsque l'accès deviendra plus difficile, la grue sera remplacée par un double système de pompage hydraulique. Une pompe aspirante à grand débit permettra d'ajouter de l'eau aux sédiments à l'intérieur de la barge et de les diluer jusqu'à l'obtention d'une boue de consistance fangeuse. Une pompe refoulante à petit débit reliée à un pipe-line permettra d'aller déposer cette boue à l'endroit désiré sur le fond. Enfin, aux endroits où la précision devra être supérieure ainsi qu'aux endroits où la remise en suspension des sédiments risque d'être plus dommageable pour l'environnement (matériau contaminé, courant localement plus fort), un "amortisseur de flux"

sera adapté à l'extrémité du pipe-line rejetant les sédiments. Cet appareil consistera simplement en une boîte munie de cloisons partielles à l'intérieur et d'orifices sur un des côtés. Les cloisons serviront à réduire la violence du flux et la vitesse des particules en les déviant à plusieurs reprises, alors que les orifices permettront leur expulsion vers l'extérieur. Le côté de la boîte présentant les orifices devra être orienté vers le fond de manière à minimiser encore plus la remise en suspension des particules. Enfin, "l'amortisseur de flux" sera relié à une bouée de façon à le rendre facilement repérable depuis la surface et à corriger rapidement son mauvais positionnement éventuel. L'emploi de la pompe à petit débit aidera également à réduire la diffusion des particules dans l'eau et, par là, la détérioration de l'environnement.

Avant même de commencer le dépôt des sédiments, un sondeur déterminera précisément le profil du fond à l'emplacement prévu pour le cavalier. Des bouées seront placées de manière à guider la barge vers les endroits de déchargement. Le dépôt des sédiments se fera par couches successives, la première couche servant à combler les dépressions du lit. Chaque couche suivante sera déposée avec un certain retrait par rapport à la couche sous-jacente, un peu à la manière des marches d'un escalier. Cette méthode permettra, après les éboulements naturels, de respecter les pentes prescrites. Un sondage continuera permettra de vérifier la précision et la bonne marche des travaux.

Il est important de noter que tout l'équipement requis pour ces travaux est déjà disponible au Québec, même s'il n'a encore jamais été utilisé à de telles fins. Des travaux similaires ont cependant déjà eu lieu aux Etats-Unis et en France, ce qui en démontre la faisabilité technique. De plus, advenant un futur développement de la technologie, plusieurs compagnies pourront acquérir facilement l'équipement requis, étant donné son coût relativement faible.

4.4 Etudes préliminaires

L'aménagement retenu, de type îlot-marais à haut fond, a été conçu à partir des données fragmentaires sur la nature et les volumes de matériaux qui seront dragués ainsi que sur les caractéristiques de l'emplacement sélectionné. Il est entendu qu'avant la réalisation des plans et devis, une caractérisation plus détaillée du site retenu devra être réalisée. Cette caractérisation devrait inclure :

- une bathymétrie précise du site ;
- une étude des courants et des vagues. Cette étude est essentielle à l'évaluation de la stabilité de l'ouvrage et aux calculs de taux de diffusion des sédiments lors du dépôt ;
- une analyse des caractéristiques géotechniques (granulométrie, teneur en eau, limite d'Attenberg, etc.) du fond du lac Saint-Pierre au site d'intervention. Cette analyse devrait permettre de définir les tassements que subira l'aménagement. Elle pourrait consister en un forage à 30 m de profondeur et un sondage de 90 m visant à préciser l'épaisseur du dépôt d'argile ;
- il faudrait également déterminer rigoureusement les volumes de matériaux qui seront dragués dans le port de Sorel lors des travaux de décontamination puisque la dimension et la forme générale sont en partie fonction du volume de sédiments à confiner ;
- une étude visant à caractériser les matériaux à draguer du point de vue géotechnique (granulométrie, teneur en eau, limites d'Attenberg, etc.) afin de pouvoir évaluer la stabilité générale de l'ouvrage. Une quinzaine d'échantillons représentatifs des matériaux à draguer au port de Sorel et une quinzaine en provenance du chenal devraient être analysés. Huit autres échantillons (6 de Sorel et 2 du chenal) pourraient être soumis à des tests de conductivité hydraulique et de lixiviation afin d'évaluer la stabilité chimique de l'ouvrage (taux de migration des contaminants) ;
- une étude visant à vérifier l'intérêt d'utiliser des agents stabilisants, comme mentionné précédemment. Notons toutefois qu'une telle étude n'est pas essentielle à la réalisation du projet.

4.5 Surveillance des travaux et suivi

Une surveillance technique étroite devrait être exercée lors de la réalisation des travaux de façon à s'assurer de leur conformité avec le devis technique et de pouvoir apporter des modifications dans le cas de contraintes imprévues.

Une révision des plans devra être effectuée chaque année de manière à tenir compte des volumes et de la qualité des matériaux qui seront dragués ainsi que du comportement général de l'aménagement.

Trois types de suivi devront être réalisés. Le premier permettra de préciser les tassements, la résistance de l'ouvrage aux cisaillements et sa résistance face à l'érosion des vagues et des glaces. Ce suivi de la stabilité générale de l'aménagement nécessitera dès les premières années l'installation de tassomètres. Ces appareils devraient être placés à la base et juste au-dessus de

la couche de sols contaminés (deux paires dans la partie flot et une paire dans la partie marécageuse). Ces repères permettraient de suivre l'évolution des tassements des dépôts.

Des piézomètres localisés près des tassomètres et dans l'argile sous-jacente pourraient également être utilisés afin de suivre l'évolution de la stabilité de l'ouvrage en cours de construction et, d'autre part, de suivre l'évolution de la consolidation.

L'évaluation de la résistance de l'aménagement à l'érosion des vagues et des glaces pourrait être réalisée par l'étude des profils des berges.

Le second suivi servira à confirmer l'absence de transfert chimique des contaminants du coeur de l'assise vers le pourtour de l'îlot et dans le biote. Ce suivi nécessitera le prélèvement d'échantillons de sédiments, de végétaux et de faune benthique (et au besoin de faune ichthyenne et avienne). Quelques échantillons pourraient être récoltés avant même la construction. Ils serviraient à comparer les teneurs en contaminants avant et après la création de l'aménagement.

Enfin, le troisième suivi permettra d'évaluer l'évolution du couvert végétal et la richesse des habitats créés pour la faune. A cette fin, des relevés sur la végétation et la faune utilisant le site devraient être pris de façon périodique.

Les données ainsi obtenues permettront d'une part de démontrer le bien-fondé de l'utilisation des résidus de dragage contaminés ou non à des fins d'aménagement faunique et, d'autre part, de planifier les travaux similaires qui pourraient éventuellement être réalisés dans le Saint-Laurent.

5. EVALUATION DU PROJET

5.1 Faisabilité technique

L'aménagement proposé apparaît techniquement réalisable dans la mesure où l'information disponible actuellement est valable. Celle-ci n'est basée que sur des données fragmentaires et incomplètes sur les matériaux constitutants et les caractéristiques biophysiques du site d'intervention. A titre d'exemple, les données géotechniques disponibles ne nous permettent pas de définir avec précision la nature de ce lit dans le secteur d'intervention. Pour les fins de la présente étude, on a présumé que le dépôt d'argile était normalement consolidé dans les vingt premiers mètres et surconsolidé au delà de cette profondeur ; les tassements seraient donc principalement attribuables aux argiles des vingt premiers mètres. Or, si les sols compressibles se retrouvent en réalité sur une épaisseur plus grande, les tassements pourraient être plus importants que prévu (l'annexe 3 présente le calcul des différents tassements envisagés selon différentes hypothèses sur la nature du fond).

Il faut également noter que quelques variations plus ou moins importantes dans la quantité de sédiments disponibles peuvent être tolérées par notre concept d'aménagement puisque ce dernier présente une grande souplesse dans le volume de matériaux qu'il peut entreposer. En variant la taille des différentes parties les unes par rapport aux autres, il est possible d'augmenter ou de diminuer les proportions des différents matériaux ou le volume total.

5.2 Faisabilité économique

Le tableau 3 présente une estimation des coûts (en dollars 1991) pour chacune des dix années de réalisation du projet. Les coûts estimés (classe B) ont été partagés entre les intervenants sur les bases suivantes :

- le promoteur devrait assumer l'ensemble des coûts liés au dragage et au dépôt des sédiments de façon sécuritaire ;
- les montants nécessaires aux travaux de planification (caractérisation, plans et devis, développement technologique) et de suivi devraient être payés à 80 p. 100 par le Centre Saint-Laurent ;

TABLEAU 3 Estimation et partage des coûts entre les intervenants

	Transport Canada		Environnement Canada	TOTAL
	Port de Sorel	Voie navigable	Centre Saint-Laurent	
Travaux préliminaires				
• Caractérisation du site	4 500	4 500	36 000	45 000
• Caractérisation des sédiments	5 000		20 000	25 000
• Évaluation des volumes à draguer	25 000			25 000
• Plans et devis	10 000	10 000	80 000	100 000
TOTAL	44 500	14 500	136 000	195 000
Année 1 (1992)				
• Dragage (15 000 m ³)		530 000		530 000
• Surveillance technique		3 000	12 000	15 000
• Suivi et instrumentation	3 500	3 500	28 000	35 000
TOTAL	3 500	536 500	40 000	580 000
Année 2 (1993)				
• Révision des plans	500	500	4 000	5 000
• Surveillance technique	3 000	3 000	24 000	30 000
• Dragage (15 000 + 30 000 m ³)	735 000	450 000		1 185 000
• Géotextile	130 000			130 000
• Suivi	2 000	2 000	16 000	20 000
TOTAL	870 500	455 500	44 000	1 240 000
Année 3 (1994)				
• Révision des plans		2 000	8 000	10 000
• Surveillance technique		3 000	12 000	15 000
• Dragage (15 000 m ³)		530 000		530 000
• Suivi	4 500	4 500	36 000	45 000
TOTAL	4 500	539 500	56 000	600 000
Année 4 (1995)				
• Révision des plans		1 000	4 000	5 000
• Surveillance technique		3 000	12 000	15 000
• Dragage (15 000 m ³)		530 000		530 000
• Suivi	2 500	2 500	20 000	25 000
TOTAL	2 500	536 500	36 000	575 000
Année 5 (1996)				
• Révision des plans		2 000	8 000	10 000
• Surveillance technique		3 000	12 000	15 000
• Dragage (15 000 m ³)		530 000		530 000
• Suivi	3 000	3 000	24 000	30 000
TOTAL	3 000	538 000	44 000	585 000
Année 6 (1997)				
• Révision des plans		2 000	8 000	10 000
• Surveillance technique		3 000	36 000	39 000
• Dragage (60 000 m ³)		1 700 000		1 700 000
• Suivi	3 000	3 000	24 000	30 000
TOTAL	3 000	1 708 000	68 000	1 779 000
Année 7 (1998)				
• Révision des plans		1 000	4 000	5 000
• Surveillance technique		4 000	16 000	20 000
• Dragage (30 000 m ³)		900 000		900 000
• Suivi	4 000	4 000	32 000	40 000
• Mise en végétation			30 000	30 000
TOTAL	4 000	909 000	82 000	995 000
Année 8 (1999)				
• Suivi	3 000	3 000	24 000	30 000
TOTAL	3 000	3 000	24 000	30 000
Année 9 (2000)				
• Suivi	3 000	3 000	24 000	30 000
TOTAL	3 000	3 000	24 000	30 000
TOTAL	941 500	5 243 500	554 000	6 609 000

Les coûts sont donnés en dollars de 1991

- les coûts liés à la mise en végétation devraient être assumés entièrement par le Centre Saint-Laurent.

Le coût de réalisation du projet estimé (comprenant la planification et le suivi) s'élève à un peu moins de sept millions de dollars répartis sur dix ans. Selon la proposition de partage des coûts présentée ci-haut, le port de Sorel devrait déboursier près d'un million de dollars réparti principalement sur deux ans, soit près de 32 \$ par mètre cube de matériaux excavés¹⁰. Ce montant apparaît tout à fait raisonnable si on le compare à ceux généralement associés aux technologies de décontamination ou de confinement.

Quant à la Division des voies navigables, son implication financière serait d'un peu plus de cinq millions répartis sur neuf ans. Ce montant se justifie nettement par la nécessité de sauvegarder l'intégrité environnementale du lac Saint-Pierre. Transports Canada devrait donc voir dans ce projet une occasion utile de démontrer sa compétence à solutionner des problèmes environnementaux.

Enfin, les programmes de contribution du Plan d'action Saint-Laurent ou de tout autre intervenant public devraient être sollicités ou contribuer pour un montant de 634 000 \$ afin d'assister les promoteurs dans leur volonté d'appliquer de nouvelles solutions aux problèmes de disposition des matériaux de dragage dans le lac Saint-Pierre.

5.3 Répercussions environnementales

On distinguera trois principales sources d'impact découlant du projet d'aménagement. Il s'agit de la perte éventuelle et de la dispersion de particules lors du dépôt des matériaux de dragage, du risque de relargage de contaminants (métaux lourds et BPC) lors de la manipulation des matériaux du port de Sorel et finalement de la présence physique de l'aménagement au site choisi.

La possibilité de perte et de dispersion des matériaux de dragage lors du dépôt au site 2 devra faire l'objet d'une attention particulière. Des mesures préventives devront être prévues une

¹⁰ Il faudrait calculer un montant additionnel d'environ 6 \$ par mètre cube de matériaux dragués si des agents stabilisants sont utilisés. Bien que ces agents peuvent augmenter les capacités géotechniques de l'ouvrage, leur utilisation n'est cependant pas essentielle.

fois qu'on aura évalué avec justesse l'ampleur de cette source d'impact. Celle-ci pourra être évaluée à partir des données sur la vitesse des courants et la nature granulométrique des matériaux. L'impact résiduel devrait néanmoins être faible compte tenu des volumes de matériaux et de la faible sensibilité environnementale des zones adjacentes.

Le relargage des contaminants contenus dans une partie des matériaux à utiliser ne présente que peu de risque. On prévoit en effet l'utilisation, au besoin, d'une membrane géotextile flottante annexée au cavalier de l'assise. Celle-ci sera par la suite rabattue sur les matériaux contaminés. Par ailleurs, le confinement des sédiments contaminés du port de Sorel constitue un impact positif important puisque, une fois isolés, les contaminants ne seront plus susceptibles de cheminer dans l'écosystème via, notamment, la chaîne alimentaire.

La présence physique de l'aménagement ne créera pas d'impact négatif notable en raison de sa superficie très réduite dans sa forme finale. Elle ne sera en effet que d'environ 3,5 ha. De plus, selon l'analyse faite par Hamel, Beaulieu (1989), le site 2 retenu pour la réalisation du projet pilote se trouve dans un secteur ne présentant pas une forte résistance environnementale. On n'y rencontre en effet pas d'aire de fraie importante et il ne s'agit pas non plus d'une zone particulièrement fréquentée par les pêcheurs sportifs. La profondeur y est inférieure à 3,3 m (10 pi), ce qui n'en fait pas, selon les critères du MLCP, un lieu de prédilection pour l'esturgeon. Cependant, le site 2 se trouve dans une zone utilisée par les canards plongeurs au cours de leurs migrations saisonnières. Il s'agit là du principal facteur susceptible de conférer une sensibilité environnementale au site retenu. De plus, mentionnons qu'aucun impact visuel n'est appréhendé puisque le site retenu pour la réalisation de l'aménagement est localisé loin des rives du lac.

Enfin, un impact positif important est à prévoir sur la productivité faunique avec, comme conséquence, un impact tout aussi positif sur les activités de chasse et de pêche sportives. En outre, la réalisation du projet pilote présente l'avantage de permettre l'amélioration de l'expertise dans les domaines de la gestion des sédiments, de la création d'aménagements fauniques et éventuellement de la stabilisation des contaminants.

Donc, dans l'ensemble, le projet pilote dans sa forme actuelle n'est pas susceptible d'engendrer des impacts négatifs importants sur l'environnement du lac Saint-Pierre. Au contraire, les impacts seront plutôt positifs.

6. ASPECTS LEGAUX

Avant la réalisation du projet, le promoteur devrait négocier une entente avec le gouvernement provincial dans le but de pouvoir utiliser le site envisagé. En effet, la Loi sur les terres du domaine public (LRQ Chap. T-8.1) établit l'autorité du ministère de l'Energie et des Ressources sur toutes les terres qui font partie du domaine public, y compris " les parties du lit du fleuve et du golfe Saint-Laurent qui appartiennent au Québec par droits de souveraineté ". Toutefois, lorsque les rives, rivières et fleuves sont concernés, la Loi sur le régime des eaux (LRQ Chap. R-13) reçoit alors application et confie la charge de son exécution au ministère de l'Environnement. La délimitation, l'aliénation, la location ou toute autre modalité d'occupation des rives et du lit des fleuves, rivières et lacs faisant partie du domaine public doivent cependant, selon l'article 2, 4^e alinéa, faire l'objet d'un règlement du gouvernement du Québec imposant les conditions d'une telle transaction et autorisant le ministre de l'Environnement à conclure une entente, quelle qu'elle soit.

Les pouvoirs du gouvernement étant très étendus, il existe plusieurs options de négociation fédérale-provinciale eu égard à la délimitation, à l'acquisition, à la location ou à l'utilisation du site de construction envisagé. A cet effet, on doit contacter le Service du contrôle des rives et du littoral (responsable : M. Pierre Desforges, 644-3485). Il apparaît cependant important que le promoteur concerné, c'est-à-dire Transports Canada, investisse le maximum possible pour avoir la garde et le contrôle du site pendant la période prévue d'utilisation, soit probablement plus de dix ans. S'il y a lieu, il pourrait être avantageux de confier ultérieurement la gestion du site à un organisme sous juridiction fédérale, tel le Service canadien de la faune.

7. CONCLUSION

Conçu dans le but d'offrir des habitats propices à la faune ichthyenne et avienne, le concept d'aménagement retenu parmi les sept proposés dans l'étude permet de résoudre, pour plusieurs années à venir, le problème de disposition des matériaux de dragage dans le lac Saint-Pierre. Il permet également de confiner de façon sécuritaire les sédiments contaminés qui seraient dragués lors des éventuels travaux de décontamination du port de Sorel.

Les sédiments contaminés pourraient servir à construire le coeur d'un haut-fond qui formerait l'assise d'un îlot et d'un marais. Adjacent à ces habitats, une construction identique pourrait recevoir à son tour des quantités appréciables de sédiments après le remplissage du premier. Afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage, il devrait d'une part être localisé à l'amont du lac Saint-Pierre, dans un secteur où le couvert de glace est stable et, d'autre part, être protégé des vagues de vent et de batillage par des hauts-fonds. L'aménagement devra de plus être situé de manière à ne pas entraver l'utilisation et l'accès du secteur par la faune, les riverains et les autres usagers.

Avant l'élaboration des plans et devis finals, des études visant à caractériser le secteur d'intervention et les matériaux à utiliser pour la construction de l'ouvrage devront être complétés. De plus, il serait pertinent d'effectuer une étude permettant d'évaluer la possibilité et l'utilité de stabiliser les boues contaminées à l'aide d'agents chimiques. Bien que la stabilisation ne soit pas essentielle à la réalisation du projet, l'ajout d'agents stabilisants permettrait vraisemblablement d'améliorer le produit final en augmentant la rapidité de consolidation et la durabilité générales de l'ouvrage et en garantissant une meilleure retenue des contaminants à l'intérieur de l'ouvrage.

Un suivi des travaux devrait être entrepris afin d'évaluer le comportement de l'ouvrage (stabilité physique et chimique) et la valeur des habitats créés pour la faune. Les données ainsi recueillies devraient permettre de démontrer le bien-fondé d'une utilisation des matériaux de dragage contaminés ou non à des fins d'aménagements fauniques.

Au total, les travaux sont évalués à près de sept millions de dollars. Ce coût est relativement faible en comparaison des méthodes traditionnelles de décontamination ou de confinement. Par ailleurs, une telle dépense est tout à fait justifiée dans la mesure où les agences

gouvernementales sont maintenant prêtes à agir afin de sauvegarder les habitats essentiels dans le lac Saint-Pierre.

Il est cependant important que le Centre Saint-Laurent s'implique financièrement afin d'aider les promoteurs à développer un mode de gestion qui respecte les exigences environnementales. Le Centre devrait donc contribuer de façon significative à la planification et au développement des nouvelles technologies environnementales (stabilisation, mise en végétation, etc.). La participation du Centre Saint-Laurent est d'autant plus importante que le projet d'aménagement faunique dans le lac Saint-Pierre marque une étape importante du Plan d'action Saint-Laurent en ce qui concerne la recherche de solutions concrètes pour la gestion des matériaux de dragage.

8. BIBLIOGRAPHIE

AMENATECH INC., 1988. Rapport technique final. Analyse de sédiments prélevés au quai de Sorel, pour Travaux publics Canada, 10 pp.

BELANGER, L., D. LEHOUX et C. GRENIER, 1989. Propositions d'aménagement des îles du fleuve Saint-Laurent pour la sauvagine à partir de matériaux de dragage (secteur Montréal - Trois-Rivières). Environnement Canada, 126 pp. et annexes.

COMITE D'ETUDE SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT, 1978. Plan d'utilisation des matériaux dragués dans le fleuve Saint-Laurent, Annexe 6, 180 pp.

CENTREAU, Université Laval, 1974. Etude du fleuve Saint-Laurent, tronçon Varennes-Montmagny. Aspects physiques et sédimentologiques. Rapport général, 270 pp.

COTE, L., P. LECLERC, Y. DESCOTEAUX et Y. VIGNEAULT, 1988. Les aménagements agricoles en plaines inondables pour une protection des habitats fauniques. Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques, n° 1978. Pêches et Océans Canada, 68 pp.

DANYS, J.V. 1972 Earth and rockfill mound on soft clay in Lake St. Peter, P.Q. Technical note. 25th Geotechnical Conference - University of Ottawa - déc. 7-8, 1972. 14 pp.

DENIS JACQUES ENR., 1986. Cartographie des terres humides et des milieux environnants du lac Saint-Pierre. Corporation pour la mise en valeur du lac Saint-Pierre, 70 pp.

GILBERT, L. et L. BARIBEAU, 1980. Caractérisation de la qualité des sédiments du port de Trois-Rivières. Présenté par GDG Environnement Ltée à Environnement Canada, Conservation et protection, 115 pp. et annexes.

HAMEL, BEAULIEU ET ASS., EXPERTS-CONSEILS. 1989. Développement d'un outil de gestion des déblais de dragage, Lac St-Pierre, Québec. Rapport final. Travaux publics Canada. 130 pp. et annexes.

HYDROTECH INC. 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-laurent. 185 pp. et annexes.

LARSON, R.S., 1989. Capping of contaminated sediments - A case study. P. 589-596 dans : Dredging Technology, Environmental Mining. Proceedings of WODCON XII, Orlando, Florida, USA, May 2-5, 1989.

LEFOR, M. W., 1987. Phalaris arundinacea L. as a hydrophyle in Essex. Environmental Management, 6 : 771-773.

MICHEL, B., 1988. Construction des îlots artificiels. Lac Saint-Pierre. Ministère des Travaux publics du Canada, 22 pp. et annexes.

ROCHE LTEE, 1990. Création d'aménagements à partir de déblais de dragage et applicabilité de ce concept au Saint-Laurent. Environnement Canada, 206 pp. et annexes.

ROCHE LTEE, 1991. Caractérisation de la diffusion de l'écoulement pour deux sites du tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre. INRS-Eau, Québec, 25 pp. et annexes.

SAMSON, L. et R. GARNEAU, 1973. Settlement performance of two embankments on deep compressible soils. Can. Geotech. J. 10 : 211-226.

SECRETARIAT ARCHIPEL, 1984. La gestion des plans d'eau à des fins biologiques. 90 pp. et annexes.

TERRATECH. 1988a. Étude géotechnique, îlots artificiels, Lac St-Pierre, Québec. Rapport no. 1953-0-1. Travaux publics Canada. 13 pp. et annexes.

TERRATECH. 1988b. Étude géotechnique, îlots artificiels, Lac St-Pierre, Québec, Rapport no 1953-2-1. Travaux publics Canada, 5 pp. et annexes.

U.S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION, 1978. Upland habitat development with dredged material. Vicksburg, Ms., 84 pp. et annexes.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR - FISH AND WILDLIFE SERVICE, 1981. Establishment of seeded grasslands for wildlife habitat in the Prairie Pathole Region. Special Scientific Report, Wildlife n° 234, Washington, D.C. 21 pp.

ANNEXE I

***Qualité des sédiments au port de
Sorel et dans le chenal de navi-
gation du lac Saint-Pierre***

TABLEAU 1 Caractéristiques physico-chimiques des sédiments au quai de Sorel en 1988

Paramètres	Quai								Rivière Richelieu - Quai				Valeurs non-acceptables pour le rejet en eau libre	
	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne (n=8)	9	10	11		Moyenne (n=3)
As (mg/kg)	1,8	1,5	1,2	1,0	1,7	2,0	1,9	1,2	1,54 ± 0,37	1,1	0,75	1,5	1,12 ± 0,38	6
Cd (mg/kg)	1,6	0,9	0,54	0,18	0,48	0,87	0,62	0,82	0,75 ± 0,42	0,48	0,60	0,55	0,54 ± 0,06	8
Cr (mg/kg)	130	127	110	41	120	144	148	135	119,4 ± 34,0	97	24	43	54,7 ± 37,9	90
Cu (mg/kg)	89	93	218	225	180	104	146	124	143,4 ± 84,6	47	19	28	35,2 ± 14,1	60
Hg (mg/kg)	1,19	0,21	0,06	0,04	0,11	0,48	0,27	0,24	0,32 ± 0,38	0,21	0,18	0,53	0,31 ± 0,19	1
Pb (mg/kg)	455	364	45	13	64	310	92	285	203,5 ± 169,2	372	127	274	257,7 ± 123,3	60
Zn (mg/kg)	345	316	121	66	140	330	185	260	220,4 ± 106,7	253	73	132	152,7 ± 91,8	175
Huiles et graisses (mg/kg)	538	547	289	9	250	591	981	1 100	538,1 ± 366,4	811	332	774	639 ± 267	200
BPC totaux (mg/kg)*	0,068	0,074	0,041	0,023	0,06	0,087	0,097	0,075	0,066 ± 0,024	0,41	0,94	0,92	0,757 ± 0,3	0.1
Aroclor 1242														
Aroclor 1254														
Aroclor 1260														
Solides volatiles (mg/kg)	82 300	81 100	42 500	37 700	42 600	84 300	60 400	81 600	64 062 ± 20 612	69 500	12 600	27 100	36 400 ± 29 568	80 000
Carbone total (%)	3,65	3,56	4,15	4,74	3,74	3,62	3,27	3,83	3,82 ± 0,45	3,20	4,24	2,90	3,45 ± 0,70	5
Phosphore total (mg/kg)	855	810	580	480	560	850	780	835	718,8 ± 152,5	730	820	865	805 ± 68,7	1 000
Argile	40	38	13	7	19	39	24	37	27 ± 13	34	3	6	14 ± 17	
Limon	52	57	44	35	54	54	57	58	51 ± 8	40	11	12	21 ± 16	
Sable fin	6	4	33	49	23	4	16	4	17 ± 17	12	16	17	15 ± 3	
Sable grossier	2	1	10	9	4	3	3	1	4 ± 3	12	68	41	40 ± 28	
Gravier et cailloux									0	2	2	24	9 ± 13	

* La concentration des BPC totaux est déterminée par l'addition des concentrations des aroclors 1242, 1254 et 1260

Valeurs dépassant les concentrations jugées non-acceptables pour le rejet en eau libre des sédiments selon le Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent (1978)

TABLEAU 2 Caractéristiques physico-chimiques des sédiments du Lac Saint-Pierre, Courbe n° 2

Paramètres	Courbe n° 2 1988			Courbe Yamachiche 1989			Valeurs non-acceptables pour le rejet en eau libre
	88D13-2	88D13-3	Moyenne (n=2)	89D14-1	89D14-2	89D14-3	Moyenne (n=3)
As (mg/kg)	1,8	4,0	2,9 ± 1,6	0,09	0,05	0,14	0,093 ± 0,045
Cd (mg/kg)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr (mg/kg)	4	2	3 ± 1	14,1	28,7	13,7	18,8 ± 8,5
Cu (mg/kg)	2	3	2,5 ± 0,7	<2	31,9	<2	11,97 ± 17,3
Hg (mg/kg)	0,02	0,01	0,015 ± 0,007	0,13	<0,05	0,09	0,09 ± 0,04
Pb (mg/kg)	5,2	4,1	4,65 ± 0,78	<5	<5	<5	<5
Zn (mg/kg)	26	37	31,5 ± 7,8	33,7	79,8	31,9	48,5 ± 27,2
Huiles et graisses (mg/kg)	107	105	106 ± 1	140	440	280	287 ± 150
BPC totaux (mg/kg)	<0,09*	<0,09*	<0,09*	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002
Aroclor 1242	<0,05	<0,05	<0,05				
Aroclor 1254	<0,02	<0,02	<0,02				
Aroclor 1260	<0,02	<0,02	<0,02				
Solides volatiles (mg/kg)	0,8 %	1,8 %	1,3 ± 0,7 %	12 946	25 316	1 003	13 088 ± 12 157
Carbone total (%)	0,35	12,34	6,3 ± 8,5	1,50	1,85	2,28	1,88 ± 0,39
Phosphore total (mg/kg)	386	509	447,5 ± 87,0	128	217	197	180,7 ± 46,7
Argile	0	0	0	0,3	3,4	<0,1	1,3 ± 1,8
Limon	0,1	0,02	0,06 ± 0,06	2,5	14,6	0,4	5,8 ± 7,7
Sable fin	0,1	0,05	0,08 ± 0,04	95,5	81,1	79,6	85,4 ± 8,8
Sable grossier	96,0	86,5	91,2 ± 6,7	1,7	0,8	18,8	7,1 ± 10,1
Gravier et cailloux	3,8	13,4	8,6 ± 6,8	<0,1	0,1	1,2	0,5 ± 0,6

* La concentration des BPC totaux est déterminée par l'addition des concentrations des aroclors 1242, 1254 et 1260

Valeurs dépassant les concentrations jugées non acceptables pour le rejet en eau libre des sédiments selon le Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent (1978)

TABLEAU 2 Caractéristiques physico-chimiques des sédiments du Lac Saint-Pierre, Courbe n°1

Paramètres	Courbe n° 1 1988			Courbe n° 1 1988		Courbe n° 1 1989			Valeurs non-acceptables pour le rejet en eau libre
	88D09-1	88D09-2	Moyenne (n=2)	88D10-1	88D11-1	89D05-1	89D05-2	Moyenne (n = 2)	
As (mg/kg)	1,7	2,8	2,25 ± 0,78	1,8	2,4	0,98	2,79	1,885 ± 1,280	6
Cd (mg/kg)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	8
Cr (mg/kg)	14	47	30,5 ± 23,3	18	38	49,7	69,8	59,75 ± 14,21	90
Cu (mg/kg)	10	32	21,0 ± 15,6	31	26	48,3	102	75 ± 38	60
Hg (mg/kg)	0,13	0,06	0,10 ± 0,05	0,05	0,07	<0,05	0,13	0,09 ± 0,06	1
Pb (mg/kg)	5,1	12	8,55 ± 4,88	12	12	<5	11,6	8,3 ± 4,7	60
Zn (mg/kg)	52	77	64,5 ± 17,7	58	75	88,6	104	96,3 ± 10,9	175
Huiles et graisses (mg/kg)	<50	<50	<50	91	<50	602	321	461,5 ± 198,7	200
BPC totaux (mg/kg)	<0,0157*	<0,0243*	<0,02 ± 0,006*	<0,0172*	<0,023*	0,04	0,03	0,035 ± 0,007	0.1
Aroclor 1242	<0,0068	<0,010	<0,008 ± 0,002	<0,0074	<0,01				
Aroclor 1254	<0,0036	<0,0057	<0,005 ± 0,001	<0,0039	<0,0052				
Aroclor 1260	<0,0053	<0,0086	0,007 ± 0,002	<0,0059	<0,0078				
Solides volatiles (mg/kg)	10 100	27 400	18 750 ± 12 233	16 300	35 000	40 261	30 465	35 363 ± 6 927	80 000
Carbone total (%)	0,42	0,84	0,63 ± 0,30	1,31	1,39	3,55	1,47	2,510 ± 1,47	5
Phosphore total (mg/kg)	555	815	685 ± 184	640	795	198	178	188 ± 14	1 000
Argile	11	78	44 ± 47	10	47	0	53,7	26,85 ± 37,97	
Limons	0	8	4 ± 6	1	6	0	28,4	14,2 ± 20,1	
Sable fin	19	6	12 ± 9	19	27	0	10,9	5,45 ± 7,71	
Sable grossier	70	8	39 ± 44	70	20	0	7,0	3,5 ± 5,0	
Gravier et cailloux	0	0	0	0	0	100	0	50 ± 71	

* La concentration des BPC totaux est déterminée par l'addition des concentrations des aroclors 1242, 1254 et 1260

Valeurs dépassant les concentrations jugées non acceptables pour le rejet en eau libre des sédiments selon le Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent (1978)

TABLEAU 2 Caractéristiques physico-chimiques des sédiments du Lac Saint-Pierre, Ancreage Yamachiche

Paramètres	Ancreage Yamachiche 1988				Ancreage Yamachiche 1989					Valeurs non-acceptables pour le rejet en eau libre
	88D15-1	88D15-2	88D15-3	Moyenne (n=3)	89D15-1	89D15-2	89D15-3	89D15-4	89D15-5	
As (mg/kg)	3,9	3,0	1,8	2,9 ± 1,1	2,88	2,04	2,46	0,97	0,87	1,844 ± 0,895
Cd (mg/kg)	2,6	2,0	0,7	1,8 ± 1,0	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Cr (mg/kg)	50	44	23	39,0 ± 14,2	63,4	61,5	63,4	64,3	78,7	66 ± 7
Cu (mg/kg)	45	46	20	37,0 ± 14,7	121	66,1	66,5	66,3	160	96 ± 43
Hg (mg/kg)	0,12	0,10	0,07	0,10 ± 0,02	0,25	0,16	0,09	0,17	0,09	0,152 ± 0,066
Pb (mg/kg)	19,5	13,8	11,0	14,8 ± 4,3	13,7	9,9	12,6	9,8	10,6	11,3 ± 1,7
Zn (mg/kg)	104	98	56	86,0 ± 26,2	119	107	109	107	151	118,6 ± 18,8
Huiles et graisses (mg/kg)	153	62	75	96,7 ± 49,2	463	287	<100	<100	417	273,4 ± 170,9
BPC totaux (mg/kg)	<0,09*	0,09*	<0,09*	0,09*	0,05	<0,02	<0,02	<0,2	0,04	0,03 ± 0,014
Aroclor 1242	<0,05	<0,05	<0,05	0,05						
Aroclor 1254	<0,02	0,02	<0,02	0,02						
Aroclor 1260	0,02	<0,02	<0,02	0,02						
Solides volatiles (mg/kg)	6,1 %	5,6 %	7,2 %	6,3 ± 0,8 %						
Carbone total (%)	0,91	0,76	0,33	0,67 ± 0,30	19 679	31 485	16 715	15 075	11 253	18 841 ± 7 695
Phosphore total (mg/kg)	1 154	1 131	986	1 090 ± 91	242	148	157	127	163	1 674 ± 0,439
Argile	0	0	0	0	548	298	627	647	99	444 ± 238
Limon	80,2	87,4	81,1	82,9 ± 3,9	28,9	29,2	33,8	24,0	29,4	29 ± 3
Sable fin	12,9	10,7	9,4	11,0 ± 1,4	48,5	43,4	41,8	47,2	53,8	47 ± 5
Sable grossier	6,6	1,6	7,9	5,4 ± 3,3	20,6	18,4	20,4	23,8	12,8	19 ± 4
Gravier et cailloux	0,3	0,3	1,6	0,7 ± 0,8	2,0	9,0	4,0	5,0	4,0	5 ± 3
					0	0	0	0	0	0

* La concentration des BPC totaux est déterminée par l'addition des concentrations des aroclors 1242, 1254 et 1260

Valeurs dépassant les concentrations jugées non acceptables pour le rejet en eau libre des sédiments selon le Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent (1978)

ANNEXE II

Stabilisation des boues de dragage

STABILISATION DES BOUES DE DRAGAGE

présentée au

**GROUPE CONSEIL ROCHE
LTÉE**

=====

préparée par

**Le Groupe de Recherche
en Géologie de l'Ingénieur (GREGI)**
(Rapport GGL-91-05)
8 mars 1991

AVANT-PROPOS

Ont participé à la préparation de ce document messieurs M.-A. Bérubé, D. Isabel, et S. Leroueil de même que J. Locat et Jean-Claude Belles-Isles qui ont agi comme responsables du projet pour le GREGI et le Groupe-Conseil Roche Ltée, respectivement.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	1
1. INTRODUCTION.....	2
2. LA STABILISATION DES SÉDIMENTS	3
2.1 PRINCIPES DE LA STABILISATION.....	3
2.1.1 Objectifs	3
2.1.2 Types d'ajouts et mécanismes de réaction	4
2.1.3 Origine des ajouts.....	5
2.1.4 Disponibilité.....	5
2.2 CONSIDÉRATIONS GÉOTECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTALES SUR LA STABILISATION	7
3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	9
3.1 ÉCHANTILLONNAGE.....	9
3.1.1 Sols contaminés	9
3.1.2 Sols pour les cavaliers.....	12
3.1.3 Limons	12
3.2 ESSAIS	12
3.2.1 Caractérisation.....	12
3.2.2 Stabilisation.....	13
3.2.3 Essais environnementaux	13
3.2.3 Evaluation.....	14
4. INSTRUMENTATION DE L'AMÉNAGEMENT ET SUIVI	15
5. ESTIMATION DES COÛTS.....	16
5.1 COÛTS DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	16
5.1.1 Échantillonnage.....	16
5.1.2 Essais de caractérisation.....	17
5.1.3 Essais de stabilisation et environnementaux	17
5.1.4 Évaluation, compilation et rédaction	19
5.2 CONSIDÉRATIONS SUR LA STABILISATION	19
6. CONCLUSION.....	21
BIBLIOGRAPHIE.....	22

1. INTRODUCTION

Le document soumis par le Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur (GREGI) a été préparé dans le cadre des travaux de planification d'un aménagement faunique sur le lac Saint-Pierre, travaux réalisés par le Groupe Conseil ROCHE Ltée pour le Centre St-Laurent et Transport Canada. Ce document est préparé pour le compte du Groupe Conseil ROCHE à la suite d'un sous-contrat obtenu par le GREGI suites aux démarches du Groupe Conseil ROCHE auprès du Centre St-Laurent.

Les objectifs du présent document sont de décrire:

- les avantages de la stabilisation des boues de dragage par le biais d'additifs tels que la chaux, le ciment, etc.
- la démarche méthodologique qui devrait être suivie afin d'en arriver à la réalisation des travaux de stabilisation dans le cadre du projet d'aménagement faunique du lac Saint-Pierre et l'échancier de réalisation de l'étude de faisabilité;
- les coûts supplémentaires engendrés par les études préliminaires et par les travaux de stabilisation.

2. LA STABILISATION DES SÉDIMENTS

Divers aspects de la stabilisation des sols allant du type de réaction aux avantages ou particularités propres à certaines méthodes sont présentés ci-après. Les considérations techniques quant aux méthodes qui seront utilisées sont décrites plus loin à la section 3. Précisons tout de suite que les sédiments considérés aux fins de la stabilisation sont les boues contaminées des zones portuaires.

L'utilisation d'ajouts minéraux dans la stabilisation des boues de dragage a déjà fait l'objet de rapports scientifiques dès 1974 (Krizek *et al.* 1974). Plus récemment, Calmano (1990) a résumé la problématique de la stabilisation des boues de dragage à l'aide de divers additifs dont la chaux et le ciment. Des travaux récents ont indiqué que même les sols à très forte teneur en eau pouvaient être mécaniquement stabilisés à l'aide de chaux (Locat *et al.* 1990, 1991). Bérubé *et al.* (1988) ont illustré les effets bénéfiques de la stabilisation à la chaux. Par contre l'application de cette technique à la stabilisation des boues de dragage n'a toujours pas été réalisée jusqu'à maintenant au Québec (voire même au Canada). Toutefois, nous avons toutes les raisons de croire au succès de cette méthode et c'est pourquoi nous considérons que le projet d'aménagement faunique du Lac St-Pierre offre une bonne occasion de développer une technologie adaptée aux conditions géologiques et climatiques du pays. Nous avons ajouté, en annexe, une copie d'un article que nous avons récemment publié (Locat *et al.* 1990) et qui révèle la possibilité, vérifiée en laboratoire, de stabiliser des sédiments argileux ayant une forte teneur en eau.

2.1 PRINCIPES DE LA STABILISATION

2.1.1 Objectifs

Dans le cadre du projet de construction d'un aménagement artificiel sur le Lac Saint-Pierre, la stabilisation des sédiments contaminés vise deux principaux objectifs: (1) une augmentation de la performance géotechnique des sédiments et (2) la retenue des contaminants métalliques dans le dépôt stabilisé.

2.1.2 Types d'ajouts et mécanismes de réaction

Afin d'améliorer artificiellement la performance mécanique des boues de dragage, nous proposons l'utilisation d'ajouts minéraux qui réagiront chimiquement avec l'eau, et avec les phases présentes dans les additifs et/ou les particules des sédiments pour former des produits cimentaires. Il existe trois types d'additifs envisageables: les ajouts hydrauliques, les ajouts pouzzolaniques et la chaux.

Les ajouts hydrauliques réagissent spontanément avec l'eau pour former des produits cimentaires et peuvent être utilisés comme seuls additifs. Le **ciment Portland**, certaines cendres volantes riches en calcium et les laitiers granulés de hauts-fourneaux en font partie. Le ciment Portland réagit rapidement avec l'eau. Les principaux produits de son hydratation sont des silicates de calcium hydratés (CSH) et environ 20% de chaux (Ca(OH)_2). Les **laitiers de hauts-fourneaux** granulés (vitrifiés) et finement pulvérisés et les cendres volantes de type C (c'est-à-dire riches en calcium) réagissent plus lentement. Leur hydraulité est due à la présence combinée de chaux libre (maintenant le pH élevé) et de phases très réactives en milieu basique (verre amorphe), ce qui a pour effet de générer des réactions pouzzolaniques et de mener à la formation plus ou moins rapide de produits cimentaires. Les laitiers peuvent même contenir un peu de C_3S , soit l'un des constituants majeurs du ciment Portland, ce qui a pour effet d'accélérer les phénomènes de cimentation.

Les ajouts pouzzolaniques ne réagissent pas spontanément avec l'eau, mais seulement en milieu basique et en présence de chaux. On peut leur fournir cette chaux de différentes manières: ajout direct (de chaux), mélange avec un liant hydraulique contenant déjà de la chaux (ex: cendres volantes calciques, laitiers de hauts-fourneaux), mélange avec du ciment Portland (la chaux est libérée lors de l'hydratation du ciment). Les **cendres volantes** de type F (i.e. pauvres en calcium) et les **fumées de silice** sont des ajouts pouzzolaniques et doivent donc être utilisées de concert avec l'un des liants hydrauliques précédemment décrits, ou encore avec de la chaux.

La chaux n'est ni hydraulique, ni pouzzolanique. Toutefois, une solution saturée de chaux possède un pH très basique d'environ 12.5, ce qui favorise les réactions pouzzolaniques avec les phases amorphes des ajouts pouzzolaniques (réactions assez rapides) et les phases présentes dans les sédiments (réactions relativement lentes). La chaux fournit également le calcium requis pour la précipitation des phases cimentaires. Utilisée seule, la chaux réagira lentement avec les particules minérales des boues, ce qui aura pour effet de générer à plus ou moins long terme des ciments. Toutefois, dès qu'elle est ajoutée à un sol, elle agit comme un puissant flocculant, ce qui est certainement un avantage important dans le cadre de la présente application.

D'autres résidus industriels pourraient aussi être envisagés, comme par exemple les **poussières de cimenteries**, des études récentes ayant démontré qu'elles pouvaient être pouzzolaniques ou même légèrement hydrauliques (essais d'utilisation dans la confection de barrières hydrogéologiques).

Une caractéristique commune à tous les ajouts ou mélanges d'ajouts utilisés dans la stabilisation des sédiments est qu'ils génèrent dans le milieu stabilisé un $\text{pH} \geq 12.5$, ce qui favorise d'ailleurs les réactions pouzzolaniques et la formation de ciments. Comme on le verra ci-après (section 2.2), un tel milieu (basique) a aussi pour effet d'entraîner la précipitation ou l'adsorption de la plupart des contaminants métalliques, ce qui n'est pas à dédaigner dans le cas présent.

2.1.3 Origine des ajouts

Outre le ciment et la chaux, qui sont des produits industriels, les autres ajouts minéraux mentionnés précédemment sont des résidus industriels. Les **cendres volantes** sont des résidus de centrales thermiques qui sont entraînés par les gaz de combustion du charbon et captés à l'aide d'appareils de dépoussiérage électrostatique. Les **fumées de silice** sont des résidus de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un fourneau à arc électrique obtenus au cours de la fabrication du silicium ou du ferrosilicium. Les **laitiers granulés de hauts-fourneaux** sont des résidus constitués essentiellement de silice, d'alumine, de calcium et d'autres bases qui sont fondues en même temps que la fonte dans le haut-fourneau. À l'état vitreux, le laitier est réactif et donne naissance à des composés hydratés doués de propriétés liantes, tandis qu'à l'état cristallisé, il est inerte. Le laitier peut être granulé lorsqu'il est en fusion en l'immergeant dans de l'eau ou en le propulsant dans l'air de façon à le vitrifier le plus rapidement possible. Utilisées dans le béton en remplacement d'une certaine quantité de ciment Portland, les fumées de silice, les laitiers granulés de hauts-fourneaux et les cendres volantes ont pour effet d'améliorer la résistance mécanique à long terme et la durabilité du béton, tout en réduisant grandement sa perméabilité.

2.1.4 Disponibilité

On trouvera au tableau 1 une liste des sources d'ajouts minéraux qui présentent le plus d'intérêt pour le projet, compte tenu de leur composition et de leur localisation géographique.

Tableau 1. Types et sources d'ajouts minéraux disponibles dans l'Est du Canada.

Type d'ajout	Provenance	Remarques
Cendre volante	Lingan (N.E.) Dalhousie (N.B.) Lakeview (Ont.) Thunder Bay (Ont.)	CaO = 1,4%, alcalis* = 2,5% CaO = 5,8%, alcalis* = 2,0% CaO = 4,0%, alcalis* = 1,5% CaO = 12,9%, alcalis* = 6,3%
Fumée de silice	SKW, Bécancour (Qué.) Timminco, Melocheville (Qué.) Elkem, Chicoutimi (Qué.)	
Laitier granulé	Stelco, Hamilton (Ont.) Algoma, Mississauga (Ont.)	
Ciment	Saint-Laurent, Joliette (Qué.) Saint-Laurent, Beauport (Qué.) Ciment Québec, Saint-Basile (Qué.) Lafarge, Saint-Constant (Qué.) Miron, Montréal (Qué.)	
Poussières de cimenteries	(Mêmes sites, sauf Miron)	
Chaux	Jolichaux, Joliette (Qué.) Domlim, Saint-Adolphe (Qué.)	
Ciment avec fumée de silice	Lafarge, Saint-Constant (Qué.) Saint-Laurent, Beauport (Qué.)	

Le Québec ne possède pas de centrales thermiques et ne produit donc pas de cendres volantes. De tels matériaux sont toutefois produits au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse, en Ontario, de même que dans les provinces de l'ouest. Le Québec ne produit également pas de laitiers de hauts-fourneaux granulés. De tels matériaux sont toutefois disponibles en Ontario, auprès des compagnies Stelco et Algoma Steel.

Du ciment et des poussières de cimenteries peuvent être obtenues de plusieurs producteurs québécois répartis entre Montréal (Saint-Constant) et Québec (Beauport). Il y a par exemple une cimenterie à Joliette. De plus, du ciment peut être obtenu en grandes quantités d'autres fournisseurs de la région de Montréal.

Le Québec produit également des fumées de silice, en trois endroits (Bécancour, Beauharnois et Chicoutimi). Toutefois, il semble que la production totale des deux plus importants fournisseurs

soit vendue aux deux plus importants cimentiers de la province, pour la fabrication de ciments prémélangés à fumées de silice. Quant à la chaux, deux usines québécoises en produisent (Jolichaux de Joliette et Domlim de St-Adolphe).

2.2 CONSIDÉRATIONS GÉOTECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTALES SUR LA STABILISATION

La stabilisation des résidus de dragage par l'ajout de résidus minéraux industriels peut procurer plusieurs avantages mécaniques et environnementaux. Ces avantages se font sentir lors de la construction des aménagements et également à moyen et à long terme.

Les premiers effets bénéfiques devraient principalement se faire sentir lors de la construction des aménagements artificiels. Les boues traitées auront une viscosité et une **vitesse de sédimentation accrues** causées par les propriétés floculantes des additifs, particulièrement la chaux. En conséquence, la mise en place des boues sera facilitée car l'étalement et la remise en suspension seront réduits. Les sédiments traités auront une vitesse de sédimentation accrue et donc un tassement initial plus rapide. Les additifs auront aussi pour effet d'augmenter le pH des eaux interstitielles des boues. Dans de telles conditions, **les métaux libres formeront des hydroxydes insolubles qui précipiteront et seront emprisonnés dans la boue**. De plus, en milieu basique, la plupart des contaminants cationiques seront adsorbés sur les surfaces des particules, ce qui les immobilisera dans les boues traitées. Les eaux surnageantes s'échappant du site de construction seront donc beaucoup moins toxiques que dans le cas de boues non stabilisées.

À moyen et long terme, l'effet bénéfique du traitement des résidus de dragage prendra d'autres formes. Des réactions pouzzolaniques se développeront progressivement entre les solides et l'eau interstitielle basique donnant lieu à la formation de ciments (CSH, CAH, et CASH) et au cloisonnement des plus gros pores. Les résidus traités acquièrent donc graduellement une plus faible perméabilité et une résistance mécanique accrue. Il en résultera une **réduction du tassement à long terme et une augmentation de la résistance au cisaillement** et donc une amélioration de la stabilité générale de l'ouvrage et la possibilité d'une **accélération de rythme de construction** de l'aménagement et plus de **flexibilité** quant à la programmation de la construction. En présence d'un excès d'additifs (selon la concentration choisie), l'eau interstitielle des boues demeurera basique et les métaux y seront emprisonnés.

La stabilisation soulève également quelques questions d'ordre environnemental. Par exemple, le pH élevé des matériaux stabilisés peut-il nuire à l'établissement d'un couvert végétal? Ce problème peut être résolu par l'emploi d'une couche tampon de matériaux non-traités à la surface de l'aménagement. L'épaisseur et la nature de cette couche doit être déterminée par modélisation. D'autre part, l'équilibre de pH avec l'eau du lac Saint-Pierre devrait se faire au sein même des sédiments stabilisés et ce, à une profondeur (à déterminer) peut-être suffisante pour ne pas nuire à la végétation.

Au pourtour de l'ouvrage et pour la portion des boues en contact avec les cavaliers, la stabilisation chimique des contaminants présents dans les sédiments traités peut-elle être annulée à plus ou moins long terme par dilution avec l'eau du lac (réduction du pH)? Les faibles porosité et conductivité hydraulique de ces matériaux limiteront sans doute le phénomène. Cet effet peut être prédit à l'aide de simples calculs (modélisation) et l'utilisation d'une membrane imperméable à l'interface entre les cavaliers et les sédiments stabilisés serait une solution possible, le cas échéant.

D'autre part, les eaux surnageantes lors de la mise en place des boues traitées auront une chimie différente de celle du milieu aquatique ambiant, à cause du pH et de l'alcalinité élevés. Nous croyons cependant que le facteur dilution va grandement limiter l'étendue et l'importance de ce phénomène. De plus, les ajouts envisagés ne constituent pas des agents contaminants.

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental proposé est décrit globalement à la figure 1. Les principales activités du programme d'essais en laboratoire gravitent autour de l'évaluation de la stabilisation de boues contaminées. L'ensemble du programme expérimental comprend les volets suivants: (1) échantillonnage, (2) essais de caractérisation au laboratoire, de stabilisation, environnementaux et (3) l'évaluation des résultats. Le but d'un tel programme est d'évaluer la faisabilité de la stabilisation des boues de dragage pour ces sédiments et de recommander, s'il y a lieu, de procéder avec cette méthode dans la réalisation des aménagements fauniques. Parmi d'autres données, les résultats de ce programme expérimental devraient indiquer les concentrations optimales en chaux d'un point de vue global. Ainsi et une fois prise la décision de stabiliser sur le terrain les boues contaminées il faudra, dans une deuxième étape, réaliser une abaque de chantier permettant à l'entrepreneur d'optimiser les ajouts d'additifs selon les caractéristiques des différents secteurs qui fourniront les boues à stabiliser. La réalisation d'une telle abaque n'est pas comprise dans le programme expérimental décrit ci-après mais seulement brièvement présentée à la section 5.1.

3.1 ÉCHANTILLONNAGE

Les échantillons pourront être récupérés de façon remaniée (*e.g.* benne). Une autre alternative est d'échantillonner à l'aide d'un carottier Lehigh (longueur maximale de 2.5 m et diamètre de 10 cm). Il faudra bien conserver les échantillons afin de ne pas modifier leurs caractéristiques physico-chimiques, de même que leur teneur en eau. La position des sites d'échantillonnage sera telle qu'elle devra assurer une représentativité quant aux caractéristiques physico-chimiques et à la teneur en eau à chaque site. Aux fins du programme d'essais qui devrait être réalisé dans le cadre du programme expérimental, seuls les échantillons de boues contaminées seront utilisés. Toutefois nous indiquons aussi quel serait le nombre minimal d'échantillons nécessaire pour les autres sédiments. Le tableau 2 présente les essais requis.

3.1.1 Sols contaminés

Des échantillons représentatifs des sols contaminés devront être obtenus afin de réaliser le programme expérimental. Il faudrait quinze (15) échantillons représentatifs du site de dragage des boues contaminées et, si possible, dix (10) autres échantillons provenant du site d'ancrage (pour les

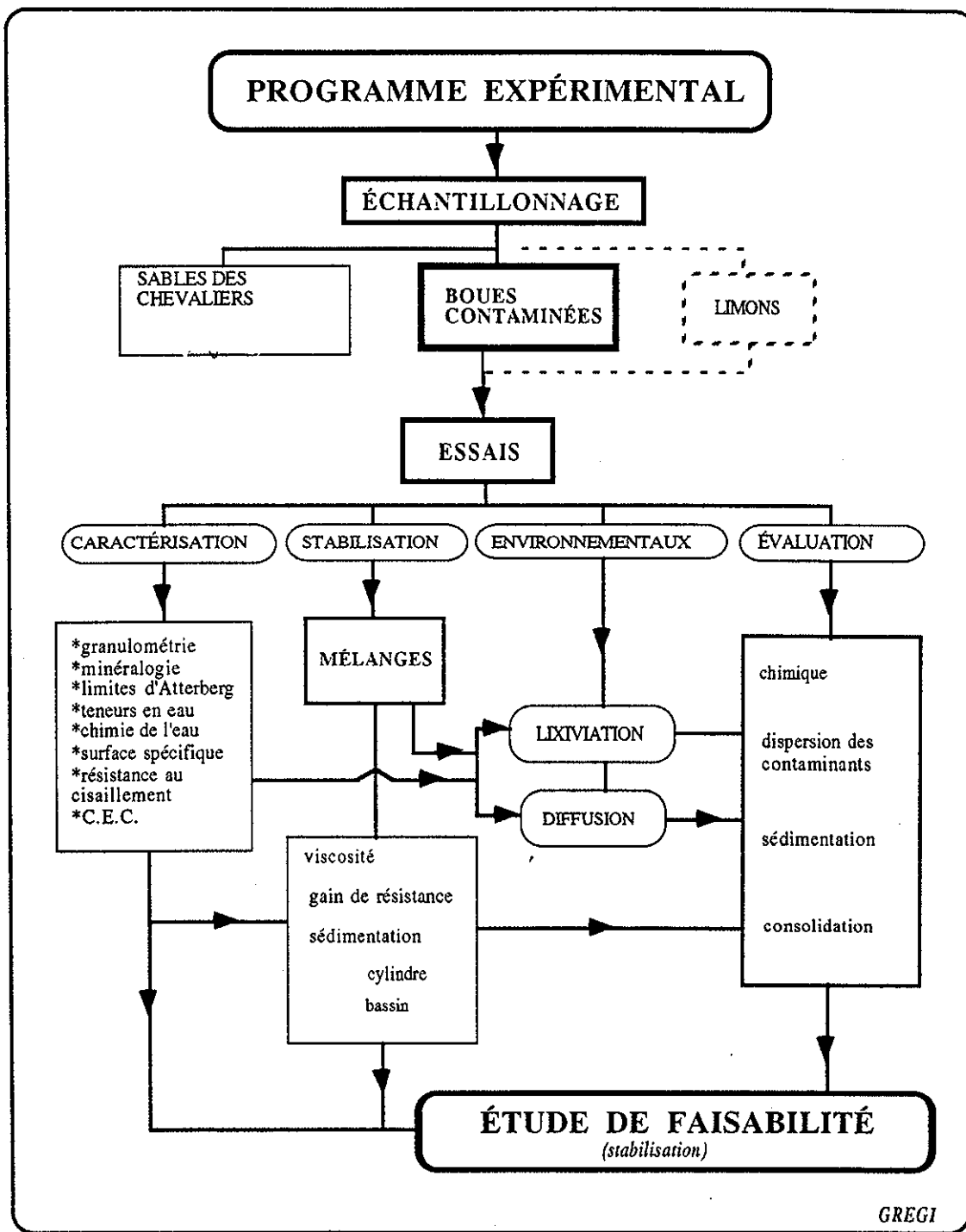


Figure 1. Planification du programme expérimental.

Tableau 2. Nombre d'échantillons et d'essais prévu pour le programme expérimental (boues) et proposé pour le projet selon le type de sédiment.

Travaux ou essais	Boues contaminées	Sables des cavaliers	Limons
Échantillonnage	25	5	10
Caractérisation			
• Granulométrie	15	5	5
• Limites d'Atterberg	15	-	-
• Teneur en eau	15	-	5
• Chimie de l'eau	5	-	-
• CEC	5	-	-
• Résistance au cisaillement	-	-	-
• Essais de consolidation	5	-	2
Stabilisation			
• Mélanges	2s.2w.3a.4t=48	-	-
• Viscosité	48	-	-
• Gain de résistance	48	-	-
• Sédimentation/cylindres	12	-	-
• Sédimentation/bassin	6	-	-
Environnementaux			
• Lixiviation en colonne	10	-	2
• Diffusion	5	-	2
• Conductivité hydraulique	5	4	2
Évaluation			
• Chimie	X		-
• Transport contaminants	X	X	-
• Sédimentation	X		-
• Consolidation	X		-

travaux futurs). Chaque échantillon devrait peser environ 20 kg. Les données générées par les différents essais réalisés sur ces échantillons pourront, le cas échéant, être utilisées pour d'autres composantes du projet (e.g. études géotechniques).

3.1.2 Sols pour les cavaliers

Il faudrait au moins 5 échantillons provenant des sites d'emprunt de sédiments devant servir à la construction des cavaliers. Chaque échantillon devrait peser environ 10 kg.

3.1.3 Limons

Bien qu'il ne soit pas prévu de draguer les limons dès la première année, il serait souhaitable de les échantillonner immédiatement afin de minimiser les coûts d'échantillonnage et d'aider à la planification ultérieure des travaux reliés à ces matériaux, le cas échéant. Il demeure aussi possible que ces matériaux soient utilisés plus tôt s'il s'avère intéressant de les mélanger aux sables des cavaliers. Environ cinq (5) échantillons représentatifs devraient suffire à cette étape. Le poids de chaque échantillon devrait être d'environ 10 kg.

3.2 ESSAIS

Les essais sont divisés en quatre groupes: (1) caractérisation, (2) stabilisation, (3) essais environnementaux, et (4) modélisation. Une brève description est fournie ci-après. Le nombre estimé d'essais à réaliser est indiqué au tableau 2.

3.2.1 Caractérisation

La plupart de ces essais sont conventionnels et visent à préciser la nature des sols impliqués dans le projet afin de mieux prévoir et comprendre leur comportement. Les analyses minéralogiques serviront à évaluer les réactions chimiques possible entre les ajouts et le sol lui-même. Les éléments suivants favorisent ou défavorisent les réactions: phyllosilicates, matière organique, quartz dans la fraction argileuse, finesse des matériaux. Les essais de résistance au cisaillement et de consolidation

permettront d'évaluer les caractéristiques typiques des sols impliqués et les données pourraient être utilisées pour une première approximation des problèmes éventuels de stabilité et de tassement.

3.2.2 Stabilisation

En premier lieu il faudra établir, pour deux teneurs en eau, une relation empirique entre la quantité d'ajouts et le gain de résistance du sol sur une période de mûrissement allant jusqu'à 100 jours. Ce type d'essai permettra d'évaluer la concentration optimale d'ajouts pour l'obtention d'une résistance à long terme satisfaisante. Pour cette étape, une série d'essais aux concentrations suivantes en ajouts: 0.5, 1, 2, 4, et 10%, devra être réalisée. La valeur de 10% peut paraître exagérée mais dans certains cas peut demeurer économique (voir plus loin). Nous croyons que des résultats intéressants pourraient être obtenus avec des quantités d'ajouts inférieures à 2%.

Pour ce qui concerne les aspects manutention et mise en place, des essais au viscosimètre devront être réalisés afin d'évaluer le comportement à court terme du mélange réalisé à la concentration optimale. La concentration en ajouts utilisée pour cette série sera établie à partir de la phase initiale mentionnée plus haut.

Afin de simuler la modification des vitesses de sédimentation, dix (10) essais pourront être réalisés dans des cylindres de sédimentation afin de suivre la vitesse de sédimentation pour quelques conditions réalistes de teneurs en ajouts. Une série de six (6) essais devrait aussi être réalisée dans un petit bassin afin de visualiser et diagnostiquer le degré de mélange entre la boue stabilisée et l'eau du bassin de réception (dispersion).

3.2.3 Essais environnementaux

Les essais environnementaux les plus importants à réaliser sont les essais de lixiviation. Ils permettent de quantifier à court et à plus long terme la qualité et la durabilité du piège physico-chimique pour les contaminants adsorbés sur les boues de dragage stabilisées.

Des essais devront être prévus pour déterminer la modification de la conductivité hydraulique des boues de dragage stabilisées. Quelques essais de diffusion permettant d'évaluer le coefficient de diffusion moléculaire seront aussi réalisés.

Les **essais de lixiviation** indiquent la mobilité des contaminants dans les matériaux. Ils sont une mesure du coefficient de partition des polluants entre la phase en solution et la phase adsorbée sur la matrice sédimentaire. Plusieurs types d'essai sont possibles: *e.g.* D3987 et D4793 de l'ASTM.

Les **essais de diffusion** devront être réalisés étant donnée la faible conductivité hydraulique des boues. À une conductivité hydraulique proche des sédiments argileux, la diffusion moléculaire est en effet souvent considérée comme le principal processus de transport des contaminants. Quelques essais en laboratoire avec traceurs sont prévus pour évaluer le coefficient de diffusion des contaminants dans les matériaux stabilisés.

Les **essais de conductivité hydraulique** seront effectués dans des perméamètres à charge variable ou à charge constante. Le coefficient de perméabilité obtenu servira à prédire le taux de transport des contaminants dans les matériaux traités et non traités.

3.2.4 Évaluation

L'évaluation comprend principalement la synthèse des différents résultats interprétés selon divers aspects pertinents au projet d'aménagement faunique. L'analyse des résultats portera principalement sur le comportement physico-chimique et géotechnique des boues stabilisées de même que du mouvement des contaminants dans les zones critiques.

La stabilisation au moyen d'ajouts minéraux, comme la chaux ou le ciment, nécessite une modélisation géochimique liée à la prédiction des équilibres dissolution-précipitation, particulièrement dans les secteurs critiques comme à l'interface entre les cavaliers et les sédiments contaminés, lieu de mélange possible avec les eaux du fleuve. Ceci appuyera aussi la planification de l'instrumentation. On peut prédire ces comportements géochimiques de spéciation avec un modèle comme PHREEQE. Ultérieurement, le couplage de ce modèle géochimique avec le modèle de transport en milieu poreux SUTRA permettra de prédire la distribution des équilibres chimiques dans l'aménagement et dans les environs immédiats.

Finalement l'évaluation va aussi porter sur les effets mécaniques escomptés de la stabilisation tant du point de vue de la sédimentation que du point de vue du gain de résistance au cisaillement des boues stabilisées.

4. INSTRUMENTATION DE L'AMÉNAGEMENT ET SUIVI

L'instrumentation de l'aménagement et son suivi auraient pour buts de préciser le comportement en consolidation et en résistance des sols contaminés, qu'ils soient stabilisés ou non, et surtout d'évaluer le comportement environnemental de l'ensemble de l'aménagement. Tel qu'indiqué dans le texte principal, certains instruments ou appareils sont déjà prévus pour les aspects généraux de l'aménagement faunique. L'instrumentation supplémentaire nécessaire comprendrait:

- i. Des puits d'observation et des bougies poreuses (10 à 20) pour échantillonner périodiquement l'eau dans les matériaux poreux sur le pourtour et à l'intérieur de l'aménagement afin d'analyser les transferts chimiques pouvant éventuellement se produire entre les sols contaminés, stabilisés ou non, et l'environnement .
- ii. Des systèmes de mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement (3), probablement des " bender elements ". Ces systèmes seraient placés dans les sols contaminés de manière à suivre les gains de résistance de ces matériaux .

Il serait souhaitable que tous ces instruments puissent être lus à partir d'un ou de deux points facilement accessibles en toutes saisons et ce, dès la phase I. Pour cela, nous suggérons la construction d'une petite île (quelques mètres carrés) en même temps où les cavaliers inférieurs seront mis en place.

Pour le suivi de la chimie et des caractéristiques mécaniques des sols contaminés dans le temps, nous suggérons que cela soit fait par échantillonnages périodiques en forages. Les échantillons seront soumis à des essais géotechniques et environnementaux de laboratoire.

5. ESTIMATION DES COÛTS

5.1 COÛTS DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

L'utilisation d'additifs comme la chaux ou le ciment pour des boues (contaminées ou non) comporte deux étapes. La première étape est celle visant à évaluer la réponse des sédiments au traitement chimique (programme expérimental proposé) alors que la deuxième étape comporte la préparation d'un abaque de chantier permettant à l'entrepreneur de planifier et d'évaluer les coûts associés à l'introduction de la stabilisation dans le processus de manutention et de disposition des boues. Le programme expérimental proposé est donc uniquement relié à la première étape à la fin de laquelle une recommandation favorable ou défavorable sera émise quant à la faisabilité de la stabilisation des boues de dragage du Port de Sorel. La réalisation de la deuxième étape (voir section 3) pourra être réalisée immédiatement après et là aussi dans un délai maximal de six mois et à un coût inférieur à la phase 1 (moins de 30 000\$).

Le programme expérimental comprend les volets identifiés à la figure 1. Pour chaque items principaux tels que l'échantillonnage, la caractérisation, les essais environnementaux et l'évaluation, le budget a été estimé en fonction des divers items tant salaire que non-salaire. Le résultat préliminaire des calculs est présenté au tableau 3. Le coût du programme expérimental est estimé à **61 821.55\$**, incluant les diverses majorations auquel doit s'ajouter 15 000\$ pour un sous-contrat visant la réalisation de l'échantillonnage. Pour un contrat de recherche entre l'université Laval et le gouvernement fédéral, la majoration sur les salaires est de 65% et les salaires indiqués comprennent les avantages sociaux. L'échéancier des activités est présenté à la figure 2 où le temps "0" correspond à la date du début des travaux lesquels s'étaleraient sur une période maximale de 6 mois.

5.1.1 Échantillonnage

La presque totalité des travaux de forage devraient être réalisés par l'entreprise privée dans le cadre d'un autre contrat. Les coûts indiqués au tableau 3 ne comprennent donc que la participation du GREGI à la planification de l'activité. Le coût estimé pour l'échantillonnages seraient de 15 000\$. À ces coûts s'ajouteraient 1 160\$ pour la participation du GREGI au niveau de la planification (incluant une visite sur le terrain).

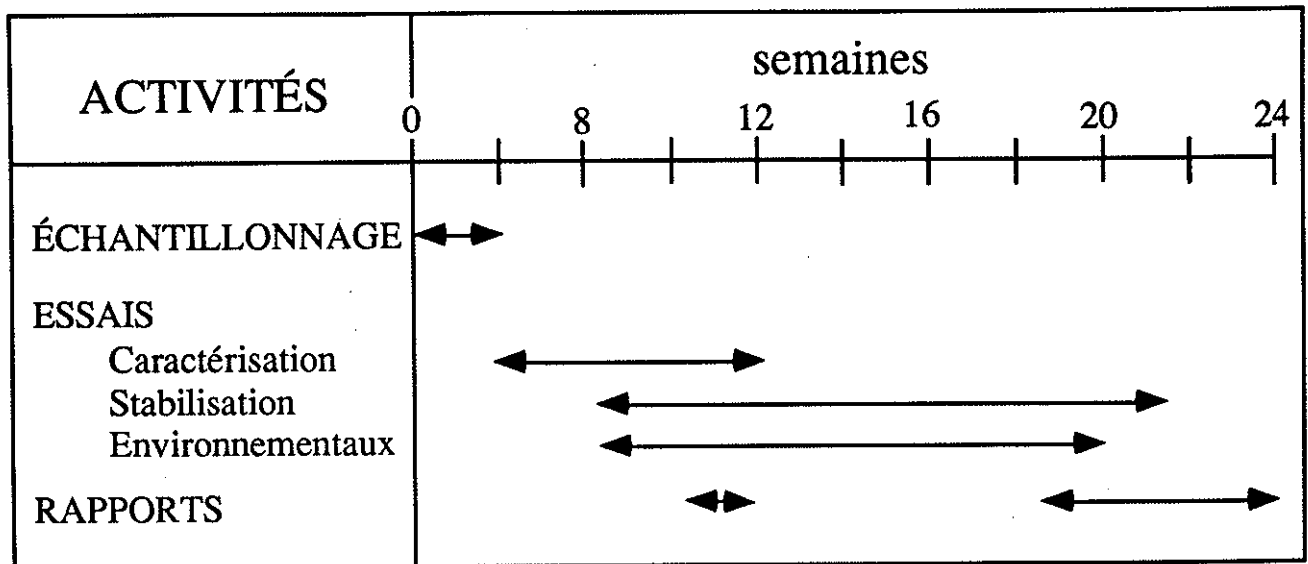


Figure 2. Échéancier de activités proposées pour la réalisation du programme expérimental.

5.1.2 Essais de caractérisation

Les essais dits de "caractérisation" sont uniquement ceux prévus dans le cadre de l'étude sur la faisabilité de la stabilisation des boues. Les essais proposés pour les autres sédiments seront caractérisés ailleurs. Ces essais sont nécessaires afin d'assurer un contrôle rigoureux sur la nature et la qualité des échantillons. Par contre, plusieurs de ces données seront également utiles pour d'autres intervenants et vice-versa. Ainsi, tous les essais de base qui seront réalisés pour caractériser le site pourront servir. Le coût total de ce volet est estimé à 10 811.00\$ et s'étalera sur une période de un mois et demi.

5.1.3 Essais de stabilisation et environnementaux

Ces essais constituent la partie principale du programme proposé. Plusieurs séries d'échantillons seront préparées et analysées. Une période de 60 à 90 dix jours est nécessaire pour la réalisation optimale des essais (incluant la période de mûrissement). Pour les essais en bassin servant à simuler l'injection de boues stabilisées, il faudra réaliser un montage expérimental; il en sera même pour les essais de diffusion. Le coût total de cette composante du projet est estimée à environ 40 914.00\$ (3.6 + 4.6 du tableau 2).

Tableau 3. Évaluation des coûts du programme expérimental

ACTIVITÉS	Taux /jour ou Coût \$	Unités/ jour(s)	Coût \$
1. ÉCHANTILLONNAGE			
1.1 Visites sur le terrain	500.00	1	500.00
1.2 Honoraires	400.00	1	400.00
1.3 Frais indirects (65% de 1.2)			260.00
1.4 Total			1160.00
2. ESSAIS DE CARACTÉRISATION			
2.1 Professionnels	175.00	15	2625.00
2.2 Assistants	120.00	20	2400.00
2.3 Matériel et Fourniture	1200.00	1	1200.00
2.4 Honoraires	400.00	2	800.00
2.5 Frais indirects (65% de 2.1, 2.2 et 2.4)			3786.00
2.6 Total			10811.00
3. STABILISATION			
3.1 Professionnels	175.00	60	10500.00
3.2 Assistants	120.00	20	2400.00
3.3 Matériel et Fourniture	2500.00	1	2500.00
3.4 Honoraires	400.00	8	3200.00
3.5 Frais indirects (65% de 3.1, 3.2 et 3.4)			10465.00
3.6 Total			29065.00
4. ESSAIS ENVIRONNEMENTAUX			
4.1 Professionnels	175.00	25	4375.00
4.2 Assistants	120.00	5	600.00
4.3 Matériel et Fourniture	1000.00	1	1000.00
4.4 Honoraires	400.00	4	1600.00
4.5 Frais indirects (65% de 4.1, 4.2 et 4.4)			4274.00
4.6 Total			11849.00
5. COMPILATION/ÉVALUATION/RÉDACTION			
5.1 Secrétariat/Dessin	800.00	1	800.00
5.2 Professionnels	175.00	3	525.00
5.3 Honoraires	400.00	8	3200.00
5.4 Services informatiques du GREGI	1500.00	1	1500.00
5.4 Frais indirects (65% de 5.1, 5.2 et 5.3)			2941.00
5.5 Total			8966.00
7.2. GRAND TOTAL			61851.00

5.1.4 Évaluation, compilation et rédaction

Cette partie du programme expérimental vise principalement l'évaluation de l'ensemble des résultats obtenus. Cette évaluation devra conclure sur la faisabilité d'une stabilisation adéquate des boues. Cette évaluation aura lieu principalement vers la fin des travaux et s'étalera sur une période d'environ 1.5 mois pour un coût d'environ 8 966.00\$.

5.2 CONSIDÉRATIONS SUR LA STABILISATION

Nous avons obtenu auprès de Ciments Saint-Laurent et de Jolichaux des coûts approximatifs pour les divers types d'ajouts mentionnés précédemment, livrés sur place. Il s'agit des prix du marché majorés des coûts prévisibles de transport sur le site du Lac Saint-Pierre. Ces chiffres sont très conservateurs puisqu'il n'y a eu aucune négociation à cet effet.

Tableau 4. Coûts des ajouts (livraison incluse)

Ajout minéral	\$ par tonne (livraison incluse)
Ciment Portland normal	85
Ciment avec fumées de silice (8.5%)	100
Cendres volantes (Lingan)	85
Laitiers de hauts-fourneaux	110
Chaux vive	95
Chaux hydratée	100
Poussières de cimenteries	3-4

Étant donné que nous ne savons pas encore quelle serait la concentration optimale d'additifs à utiliser dans le cadre du projet, nous avons évalué les coûts pour plusieurs concentrations en additifs et cela pour différentes valeurs de teneur en eau. La base de calcul utilisée est de 100.00\$ par tonne métrique d'additif. Les données de la figure 3 ont été calculées pour un coût au mètre cube selon la relation suivante:

[1]

$$C\$ = \left(\frac{c^* V_t G_s \gamma_w}{wG_s + 1} \right) \frac{T}{9.964}$$

où: C\$: coût par mètre cube de sol traité (\$)
 c^* : concentration en ajout, par rapport au poids du sol sec
 V_t : volume total (égal à un mètre cube)
 γ_w : poids spécifique de l'eau (égal à 10 kN/m³)
 w : teneur en eau du sédiment (par rapport au poids du sol sec)
 G_s : densité des solides (posée égale à 2.7)
 T : coût à la tonne, pour l'achat des ajouts, posé égal à 100\$ à la figure 3

En fait l'équation [1] peut être utilisée pour évaluer le coût de quelque additif que ce soit en autant que l'on puisse connaître la concentration désirée, le volume unitaire à traiter, la teneur en eau du sédiment et le coût (à la tonne) de l'additif. Par exemple, pour traiter 30 000 m³ de boues ayant une teneur en eau de 100% avec 4% de chaux, il en coûterait 3\$ le mètre cube, soit environ 90 000\$. Les seuls coûts considérés sont ceux reliés à l'achat de l'additif. Il faudra calculer aussi le coût associé à l'adaptation de la technique de disposition des boues de dragage de même que celui associé au chargement de la chaux sur les barges. À première vue et étant donné que le prix indiqué vaudrait pour une livraison de l'additif au quai, nous croyons que le prix total de l'utilisation de la stabilisation devrait représenter un coût additionnel inférieur à 6\$ le mètre cube de boues contaminées.

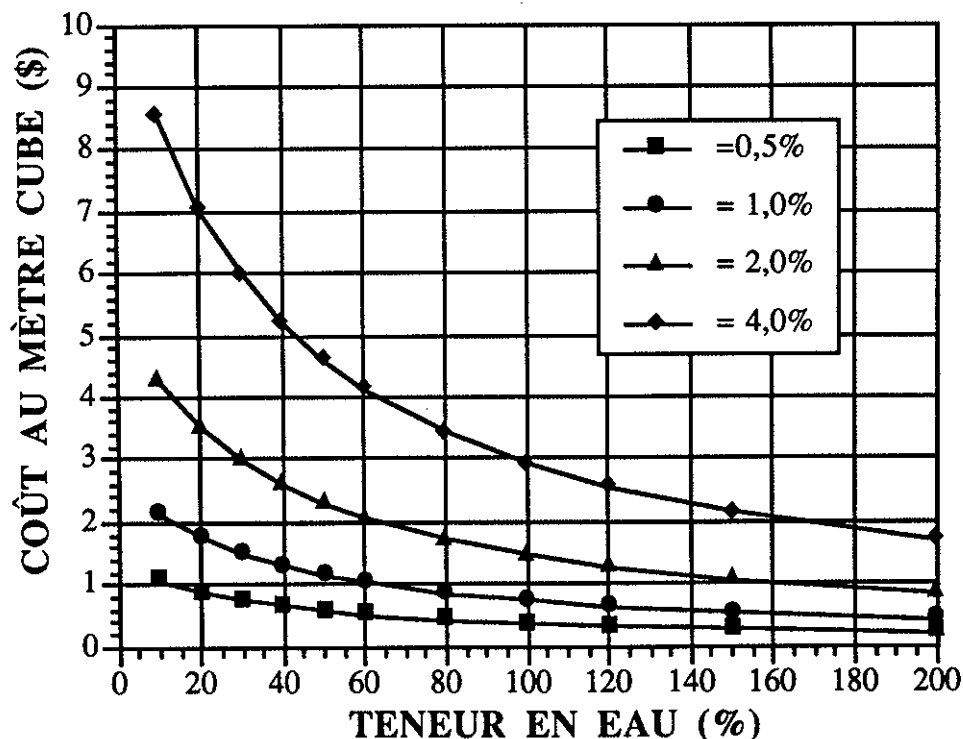


Figure 3. Coût au mètre cube de sédiments dragués pour des concentrations en ajouts minéraux allant jusqu'à 4%.

6. CONCLUSION

Le projet de stabilisation des boues de dragage permettrait de bonifier l'aménagement proposé en assurant une meilleure stabilité chimique et géotechnique de l'ouvrage.

Les coûts supplémentaires associés à l'ajout d'agents stabilisants sont estimés à moins de 6\$ le mètre cube (moins de 180 000\$ au total). Toutefois, afin d'obtenir une évaluation plus juste, une étude de faisabilité devra être réalisée. Cette étude devrait permettre en outre de mieux définir les gains en terme de stabilité de l'aménagement engendrés par l'ajout d'agents stabilisants. Cette étude pourrait être réalisée parallèlement aux travaux préliminaires de caractérisation et ce, pour une somme de 60 000\$. Une fois l'étude déposée, les promoteurs seront à même d'évaluer l'utilité de stabiliser les boues contaminées dans le cadre du projet d'aménagement faunique du lac Saint-Pierre.

Une fois la décision de stabiliser sur le terrain les boues contaminées prise, il faudra, dans une deuxième étape, réaliser une abaque de chantier permettant à l'entrepreneur d'optimiser les ajouts d'additifs selon les caractéristiques des différents secteurs qui fourniront les boues à stabiliser. Cette second étude pourrait être réalisée pour moins de 30 000\$.

BIBLIOGRAPHIE

- Bérubé, M.-A., Choquette, M., et Locat, J., 1990. Effects of lime on common soil and rock forming minerals. *Applied Clay Science*, 5:145-163.
- Bérubé, M.A., Locat, J., Choquette, M. & Fournier, B. (1988): Beneficial lime stabilization of clay soils and deleterious alkali-aggregate reactions in concrete: two phenomena related to chemical unstability of minerals at high pH and in presence of Ca(OH)_2 . *Compte-rendus de la 41e Conférence Canadienne de Géotechnique*, pp. 150-159.
- Calmano, W., 1990. Stabilization of dredged mud. *In: Environmental Management of Solid Waste, Dredged Material and Mine Tailings*. Solomon et Förstner éd., Springer Verlag, pp.: 80-98.
- Coté, P.L., et Isabel, D., 1984. Application of a dynamic leaching test to solidified hazardous wastes. *In: Hazardous and Industrial Management and Testing*. ASTM STP 851, pp.: 48-60.
- Duchesne, J. (1989): Caractérisation d'ajouts minéraux face aux réactions alcalis-granulats dans le béton. *Mémoire de M.Sc., Université Laval*, 78 p.
- Fang, H.Y. & Evans, J.C. (1988): Long term permeability tests using leachate on a compacted clayey liner material. *In: Groundwater Contamination: Field Methods*. ASTM STP 963.
- Germain, D., Frind, E.O., et Cherry, J., 1990. Finite-time stabilization of plume of non-reactive contaminants. *Journal of Hydrology* (accepté en 1989).
- Krizek, R.J., Roderick, G.L. & Jin, J.S. (1974): Stabilisation of dredged materials. Technical Report No. 2, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Locat, J., Bérubé, M.A. & Choquette, M. (1990): Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 27:294-304.
- Locat, J., Bérubé, M.A. & Choquette, M. (1991), Lime stabilization of muds. *Soumis à la Revue Géotechnique (Londres)*.
- Locat, J. & Beauséjour, N. (1987): Corrélations entre les propriétés mécaniques dynamiques et statiques des sols argileux intacts et traités à la chaux. *Revue Canadienne de Géotechnique*, Vol. 24, pp. 327-334.
- Poon, C.S., 1989. A critical review of evaluation procedures for stabilisation/solidification processes. *In: Environmental Aspects of Stabilisation and Solidification of Hazardous and Radioactive Wastes*. ASTM STP 1033, pp.: 114-124.

Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development¹

JACQUES LOCAT, MARC-ANDRÉ BÉRUBÉ, AND MARC CHOQUETTE

Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur, Département de géologie, Université Laval,
Sainte-Foy (Québec), Canada G1K 7P4

Received July 4, 1989

Accepted January 3, 1990

A laboratory investigation on the quicklime stabilization of sensitive clays has shown that, even at a water content above the liquid limit, significant strength increase can be obtained if enough time and lime are provided. The understanding of strength development is based on the recognition of physical bridging between soil particles, as in a cementation process. The physical and mechanical significance of lime stabilization is described by means of conceptual models. The better the mixing, the better the dispersion and the diffusion of lime and, consequently, the stabilization process. It has been found that the relationship between water content and strength, at a given time, follows a power law that makes possible the establishment of laboratory charts for lime stabilization of such clays.

Key words: quicklime stabilization, sensitive clays, cementation, cohesion, shear strength, microstructure, conceptual model, laboratory charts.

Une étude en laboratoire de la stabilisation à la chaux vive d'argiles sensibles a démontré que, même à une teneur en eau supérieure à la limite liquide, une augmentation significative de la résistance peut être obtenue si l'on ajoute suffisamment de chaux et que l'on attend suffisamment longtemps. La compréhension du développement de la résistance se fonde sur la connaissance de la formation de liens physiques entre les particules de sol comme dans le processus de cimentation. La signification physique et mécanique de la stabilisation à la chaux vive est décrite au moyen de modèles conceptuels. Meilleur est le malaxage, meilleures sont la dispersion et la diffusion de la chaux, et en conséquence, meilleur est le processus de stabilisation. L'on a trouvé que la relation entre la teneur en eau et la résistance à un moment donné suit une loi de puissance qui permet d'établir des chartes de laboratoire pour la stabilisation à la chaux de telles argiles.

Mots clés : stabilisation à la chaux vive, argiles sensibles, cimentation, cohésion, résistance au cisaillement, microstructure, modèle conceptuel, chartes de laboratoire.

[Traduit par la revue]

Can. Geotech. J. 27, 294-304 (1990)

Introduction

Sensitive clays of eastern Canada, Alaska, and Scandinavia are often too soft for certain engineering applications, so a chemical treatment, such as lime stabilization, can be seen as a satisfactory way of improving their strength (Bryhn *et al.* 1984). Four types of reactions can take place during stabilization: (1) cation exchange (Diamond and Kinter 1965), (2) flocculation and particle aggregation (Herzog and Mitchell 1963), (3) lime carbonation (Eades *et al.* 1962; Le Roux 1969; Pretty and Rich 1971), and (4) pozzolanic reactions between lime, silica and alumina. Reactions 1 and 2 lead to immediate improvement in soil plasticity, workability, uncured strength, and load-deformation properties (U.S. Transportation Research Board 1987). Reactions 3 and 4 lead to the formation of cementing products, as observed by many early researchers (Eades and Grim 1960; Hilt and Davidson 1960; Glenn and Handy 1963; Diamond *et al.* 1964; Sloane 1965; Ormsby and Kinter 1973). Pozzolanic reactions are responsible for long-term increase in soil strength with little or no change in water content, even many months after mixing and compaction.

The effectiveness of lime stabilization can be quite difficult to predict. The gain in shear strength (S_u), at a given time, will be a function of many variables:

$$[1] \quad S_u = f(S_{u0}, A, A_w, W_0, c, t_a, t)$$

where S_{u0} (kPa) is the undrained shear strength immediately after compaction; A is a mineralogical parameter that includes mineralogy, grain size, specific surface area, and cation exchange capacity; A_w is a parameter related to the initial pore-water chemistry; W_0 (%) is the molding water content, c (%) is the additive concentration; and t_a and t (days) the time of mellowing (Sweeney *et al.*²) and curing, respectively. The mellowing time corresponds to the time between lime mixing and compaction (normally 24 h) and curing time is the elapsed time since compaction (or molding). One must also realize that the nature of the soil is not constant: the chemical attack on minerals induces changes on parameters such as grain size distribution (by a cementation effect) and mineralogy. This leads to modification of index properties such as liquid and plastic limits (Choquette 1988). These considerations explain why, in the field of soil treatment, usually only empirical approaches are known.

In United States and Europe, lime stabilization is commonly used for improving trafficability (in fact the remolded strength), loading capacity of foundations (roads or embankments: Broms and Boman 1979; Perry 1977; Queyroi *et al.* 1985; Puiatti *et al.* 1983; Estéoule and Perret 1979), and for erosion control (Macham *et al.* 1977). In most cases, applications were developed under warmer climatic conditions than those of Québec, and at a water content near the optimum Proctor (close to the plastic limit). In Canada, detailed geotechnical investigations related to lime stabilization of sensitive clays are scarce (Brochu 1980; Quigley and

¹Presented in part at the 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, 1987.

TABLE 1. Physicochemical properties of the tested soils

Parameter	Soil*			
	BU	SE	JO	SH
<2 μm (%)	42	31	43	66
Illite (K-micas, %)	8	5	2	8
Chlorite (%)	6	2	9	15
Vermiculite (%)	6	6	11	13
Quartz (%)	31	17	18	14
Plagioclase (%)	32	42	46	39
K-feldspar (%)	14	17	15	10
Amphibole (%)	4	8	10	6
Calcite (%)	0	2	2	10
Organic matter (%)	0.2	0.5	0.3	1.9
C.E.C. (mequiv./100 g)	17	11	15	22
Surface area (m^2/g)	75	44	54	93
w (%)	37	38	50	83
w _p (%)	23	19	20	24
w _L (%)	53	34	42	55
I _p (%)	30	15	22	31
C _u (kPa)	145	90	48	17
Molding water contents (%):				
W ₁ (w _p + 5)	37	15	29	37
W ₂ (w _p + 0.5I _p)	42	24	33	45
W ₃ (w _L)	55	33	44	56
W ₄ (1.5w _L)	79	50	64	89
W ₅ (2w _L)	116	67	85	111

*BU, Buckingham; SE, Saint-Étienne; JO, Jonquière; SH, Saint-Hyacinthe.

DiNardo 1982; Quigley and Dielemans 1982; Sweeney *et al.*²) but are still conclusive about the use of lime.

The growing interest in the reutilization of poor-quality excavated materials (clay backfill), the use of compacted clay liners in landfill sites, and the prospect of lime stabilization of highway foundations in Quebec have prompted this research. Efforts were concentrated on the role played by the nature of the soil in the presence of quicklime, at water contents from 5% over the plastic limit to twice the liquid limit (Bérubé and Locat 1987). Other aspects such as fly ash addition and temperature and behavior of pure minerals in the presence of lime were investigated (Choquette 1988), although not presented hereafter. What is reported here concerns the mechanical testing of soils treated with quicklime and the effects of lime concentration, water content, and curing time at 23°C on the development of undrained shear strength in sensitive clays. Results presented underline the role of soil type, the dispersion-diffusion mechanisms during quicklime stabilization, and the possibility of stabilizing soils containing high water contents. Finally, a laboratory experimental chart is proposed to help in planning quicklime stabilization projects.

Soil characteristics

Four sites were selected for this detailed investigation: Buckingham (BU, near Hull-Ottawa), Saint-Étienne (SE, north of Trois-Rivières), Jonquière (JO), and Saint-Hyacinthe (SH, on the south side of the St. Lawrence River). These four soils are in areas of future lime stabilization projects of the ministère des Transports du Québec. At each of

the four sites, a trench was dug to collect large soil samples along a section from 1.0 m below the ground surface down to depths of 2.6–4.3 m. Various identification tests were carried out on intact or remolded samples. The physicochemical characteristics of these soils are summarized in Table 1. All soils are of low plasticity (15–31%). Their clay fraction ranges from 31 to 66%, with a specific surface area from 44 to 93 m^2/g and a cation exchange capacity (C.E.C.) from 11 to 22 mequiv./100 g, calcium being the main exchangeable cation in all soils. The total clay mineral content of each soil is between 13 and 36%, which is typical of St. Lawrence Valley sensitive clays (Locat *et al.* 1984). The Saint-Hyacinthe soil departs from the others, with a higher total carbonate content of 10% by weight. Although these four soils are not considered fully representative of sensitive clays from eastern Canada, their mineralogical and textural differences will be used to illustrate the effect of the soil characteristics on the development of pozzolanic reactions and strength.

Methodology

A mixing grid including 5 water contents and 6 quicklime concentrations (18 conditions, shaded areas of Fig. 1) was used for each of the four soils. This resulted in the molding of more than 72 samples (with four subsamples for each condition). Water content values were selected with reference to the liquid and plastic limits (Table 1). Although the optimum quicklime concentrations, obtained through the Eades and Grim (1966) test, were about 4%, quicklime contents tested ranged from 0 to 10% (basis of dry mass of solid). These values were selected to assess the effect of quicklime concentration and to ensure that enough reaction products (with 10% quicklime) would be generated to ease scanning electron microscopy (SEM) investigations. Samples were mixed with quicklime using a laboratory mortar mixer and compacted, whenever possible, at the modified Proctor energy into 90 mm diameter by 47 mm long cylinders. For water contents below the liquid limit, the density obtained ranged from 1500 to 2200 kN/m^3 , depending on the water content and soil type. Usually, at water content values near or above the liquid limit (W_3 – W_5), soil samples were too soft to be compacted; they were then poured into cylindrical plastic bottles of size similar to that of the compacted samples. All samples were kept inside a temperature-controlled humid room at 23°C, with regular monitoring of water content, which remained within 5% relative to the initial values. For all mixes, control samples without quicklime were prepared to measure the thixotropic strength gain.

Mechanical testing was carried out at the following times: 0, 1, 3, 10, 30, 100, and 300 days after mixing. Shear wave measurements (Locat *et al.* 1986), Swedish fall cone (C_u , for 0.1–250 kPa), and unconfined compression tests (S_u , for more than 250 kPa) were carried out. On some occasions, the remolded strength was measured to compute sensitivity changes generated by the stabilization process (Masson *et al.* 1986; Bérubé and Locat 1987). To minimize sample preparation, a correlation between shear strength (Swedish fall cone or unconfined compression tests) and shear wave velocity (Locat *et al.* 1986; Locat and Beauséjour 1987) was developed. This reduced by a factor of 4 the number of subsamples needed for time effects study. In this paper, unless

²D.A. Sweeney, D.K.H. Wong, and D.G. Fredlund. The effect of lime on a highly plastic clay with special emphasis on aging. To be published.

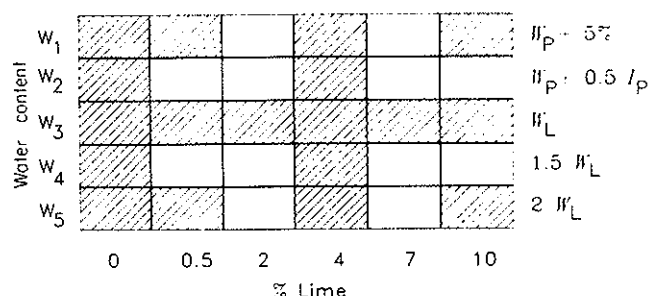


FIG. 1. Example of a soil mixing grid. Samples correspond to shaded areas.

otherwise indicated, all undrained shear strength data (S_u) are obtained from shear wave measurements (V_s) or from the Swedish fall cone strength (C_u), by the following relationships, which apply to lime-stabilized sensitive clayey soils:

$$[2] \quad S_u = 0.0014 V_s^{2.04}$$

$$[3] \quad S_u = 5.7615 C_u^{0.58}$$

For various samples, and especially for mixes with 4% quicklime at the liquid limit, and with 10% quicklime at twice the liquid limit, intensive physicochemical testing, mineralogical analyses (X-ray diffraction), and microfabric observations and measurements (SEM, Hg porosimetry) were performed to evaluate mineralogical and structural changes (Choquette *et al.* 1987; Choquette 1988).

Results

Illustration of the stabilization process

Before presenting results, it is important to consider that lime stabilization is a cementation process that significantly increases soil cohesion and shear strength. To illustrate this, results for the Buckingham soil mixed at 4% of quicklime and at a water content of 48% (close to the liquid limit) are shown in Fig. 2. Strength data obtained from unconfined compression tests carried out at various times on duplicate samples are presented. The stress-strain curves of Fig. 2 show more than a 10-fold increase in strength over a period of 200 days, and this at a nearly constant water content. During the pozzolanic reactions, cementing phases are produced and calcium and hydroxide ions in solution are continuously consumed and more must be dissolved to maintain solution equilibrium. In most cases, undissolved quicklime (in fact the lime is in its hydrated form) is left after 300 days (Choquette 1988). Strength increase with time reflects the cumulative effects of a cementation process.

Figure 3 illustrates the reaction products within the microstructure. Figure 3A and 3B present the Buckingham soil before addition of lime and after 10 days of curing with quicklime, respectively. When remolded without lime, the microfabric is still open, and individual particles and aggregates can be seen. Adding quicklime first results in a rapid exothermic hydration process and a simultaneous cation exchange that flocculates the soil into larger lumps, as seen in Fig. 3B, after only 10 days of curing. These lumps will be more or less cemented together by the subsequent pozzolanic reaction products (Figs. 3C-3F). By means of an energy dispersive spectrometer (EDS) unit coupled to the SEM, reaction products were qualitatively identified. They consist of calcium aluminum silicate hydrates (CASH) and

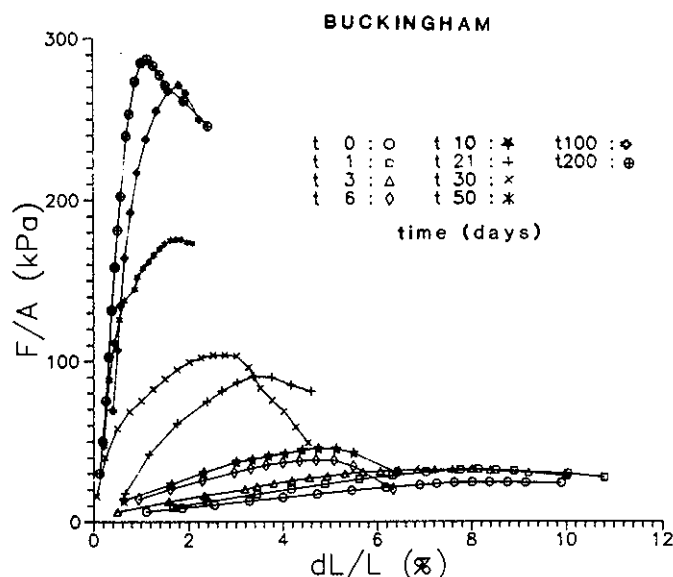


FIG. 2. Unconfined compression test curves for the Buckingham soil at 4% quicklime and a water content of 48% (liquid limit).

calcium silicate hydrates (CSH). This observation suggests that pozzolanic reactions, recognized in a number of earlier studies as responsible for long-term strength development, are in this case also the main reason for strength increase.

With these observations in mind, and considering [1], one must look at the various results presented hereafter with reference to the four selected soils. Except when discussing the effects of water content, results are presented for water contents near the liquid limit (W_3 of Fig. 1).

Effects of lime concentration and curing time

Results of 300 days of strength monitoring for various quicklime concentrations are shown in Fig. 4. It is clearly shown that at the liquid limit soils react differently as a function of lime concentration and curing time. Except for the Saint-Hyacinthe soil, any increase over 2% in lime concentration usually results in an important increase in strength. The 4% lime concentration obtained by the Eades and Grim (1966) test, as a proposed design value, obviously does not correspond to the optimum lime concentration for strength development. Although the pore water is readily saturated with respect to $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with less than 0.5% quicklime, the strength still increases with increasing lime content. At the liquid limit, the Saint-Hyacinthe soil appears more difficult to stabilize: even with 10% quicklime and after 300 days of curing time, a strength of only 300 kPa is obtained, compared with more than 1 MPa for the other soils. As will be seen later, the Saint-Hyacinthe soil is always the most difficult to stabilize, even at lower water contents.

With regards to strength development with time, the soil from Buckingham, at the liquid limit, appears to behave differently from the three other soils: its strength stays low during the first 10 days, then increases quite rapidly up to 100 days, to slowly stabilize afterwards. For the Jonquière and Saint-Étienne soils at the liquid limit, strength appears to increase more regularly. Data from these soils (Fig. 4) suggest also that with a lime concentration higher than 4% strength will continue to increase, even after 300 days. The Saint-Étienne soil generally presents a low rate of strength increase between 10 (or 30) and 100 days, with a higher rate

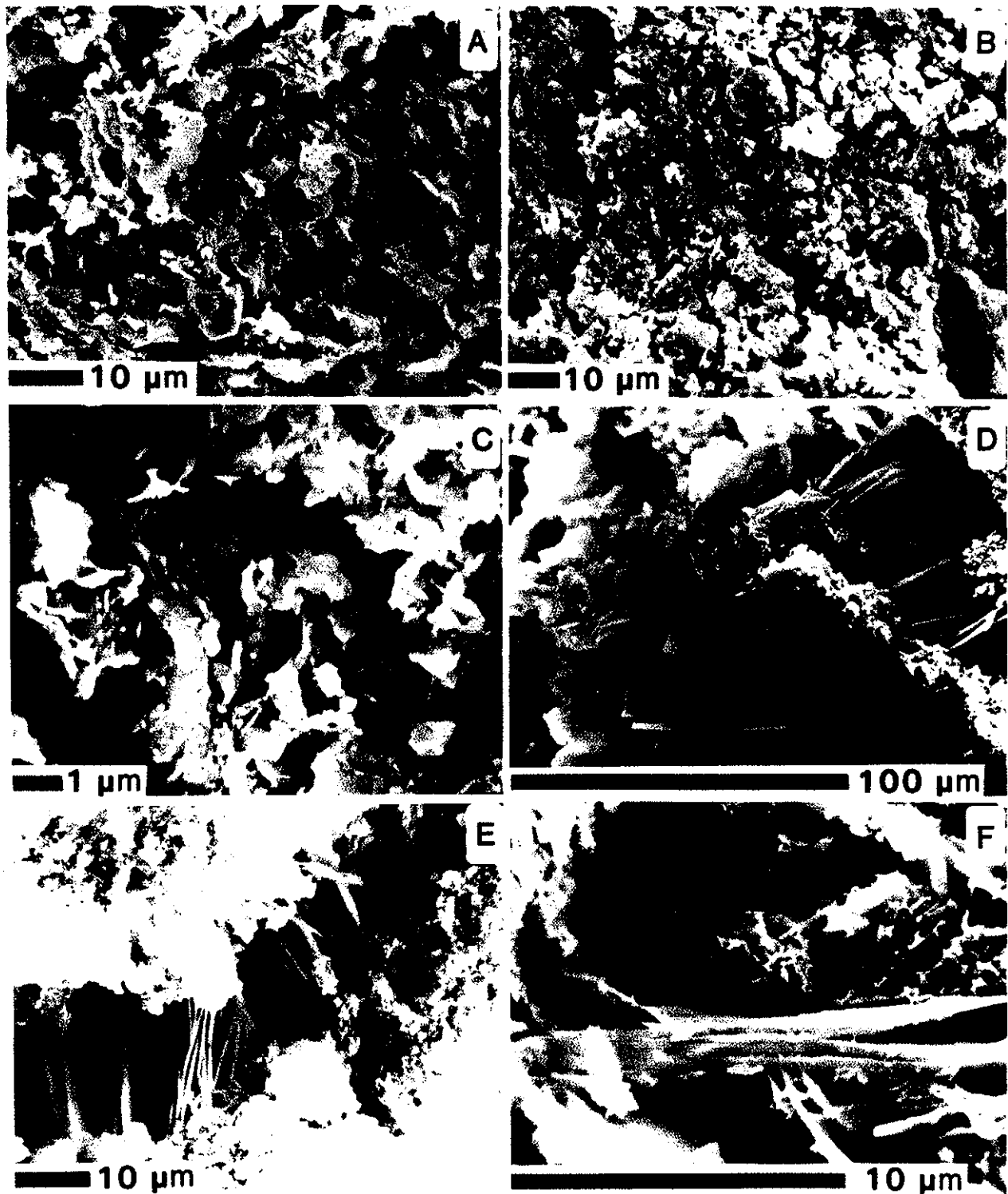


FIG. 3. SEM micrographs of the Buckingham soil at the liquid limit: (A) remolded, no lime; (B) 4% quicklime, 10 days of curing, showing lumps created by the flocculation-agglomeration reactions; (C) neoformed phases; (D) platy CASH; (E) and (F) 4% quicklime, 100 days of curing, platy CASH and reticular CSH.

afterwards. This particular behaviour has been observed at almost every water content (see Fig. 5), and is very similar to the overall behaviour of the silty soils studied by Perret (1977) and Estéoule and Perret (1979). These authors noted this transition at about 50 days of curing time. Coincidentally, the Saint-Étienne soil is the coarsest of all those tested.

Effects of water content and curing time

Figure 5 presents results for mixes with 4% quicklime as a function of time and water content. As expected for each soil, the lower the water content the higher the initial shear strength. Before comparing results for various water contents, one must distinguish between compacted (most of

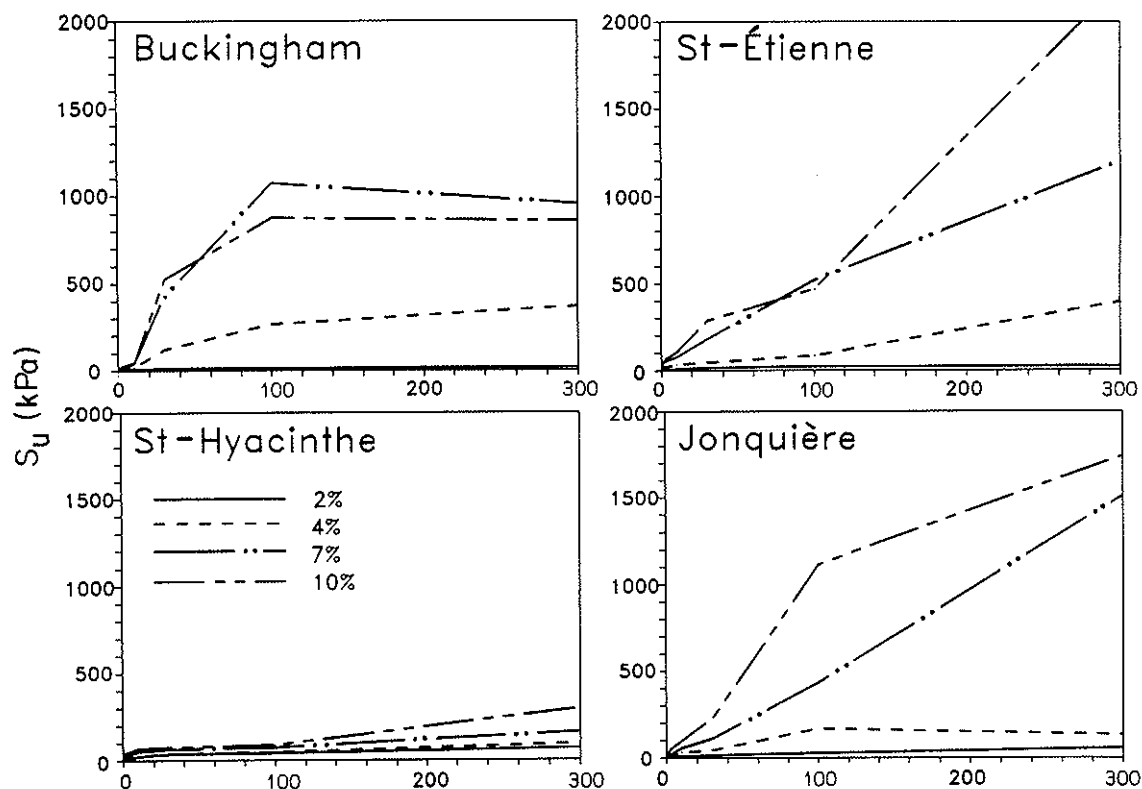


FIG. 4. Shear strength versus time for soils mixed at the liquid limit with various amounts of quicklime.

W_1 and W_2 samples, Fig. 1) and noncompacted samples, the former having a much higher initial shear strength. With regards to water content, the Saint-Hyacinthe soil behaves quite similarly to the other soils, although its ultimate gain in shear strength is still generally lower. In most cases, a break in the strength-time curve occurs at 50 days; after which the Buckingham and Saint-Étienne soils present a slow but regular increase in strength. Meanwhile, the Jonquière and the Saint-Hyacinthe soils, at this lime concentration (4%), level off after 100 days.

Results obtained at 10% lime are presented in Fig. 6. They are particularly interesting for soils mixed at twice the liquid limit (W_3). All soils at W_3 present a regular but slow increase in strength. For the Saint-Étienne soil, although its initial strength is less than 2 kPa, a value approaching 500 kPa is reached after 300 days (always at a nearly constant water content). At low water content (W_1), again all soils exhibit a similar general behavior: rapid increase in strength within the first 50–100 days, then slow or, with the Saint-Étienne soil, no more increase. At the liquid limit (W_3), each soil exhibits a different behavior. It is at, or near, this water content that the shape of the strength-time curve is most influenced by the nature of the soil. These results clearly show that a soil with a water content over the liquid limit can be stabilized. A lime concentration of 10% can be considered very high, but one must remember that, on a dry basis, for a given volume of bulk soil, the amount of quicklime needed to reach that relative value decreases with increasing water content.

In Fig. 7, shear strength results are shown as a function of water content and quicklime concentration, after 30 days of curing. Isograde curves (curves at constant lime concentration) were computed for 0, 0.5, 4, and 10% quicklime according to the following power-law relationship:

$$[4] \quad S_u = aw^b$$

where a and b are constants that, for a given isograde, are influenced by soil nature, curing time, and lime concentration. In general, correlation factors in excess of 0.9 are obtained with this relationship. This could be expected, as only a few points are used (3–5 for each curve). This equation still provides a first approximation of the strength – water content variations for various lime contents. However, care must be taken when interpreting these curves. First, sample preparation may differ along the same isograde curve (compacted to noncompacted specimens). Second, the semi-logarithmic scale is very sensitive in the end portions of the curve. At lower water contents, small change in the slope of the curve represents large absolute increases in shear strength, compared with much smaller increases at higher water contents. One could be tempted to normalize the data by using the liquidity index instead of the water content. This would be difficult to support, since index properties of these soils are strongly affected by the stabilization process (Choquette 1988), and variations could not be followed with time.

Using the curve-fitting technique described above, a composite picture was drawn (Fig. 8) to ease direct comparison between the various soils tested. Each soil is represented by a curved box drawn from test results at 0, 4, and 10% quicklime over the full water content range, and after 0, 30, and 300 days of curing time. Vertical variations reflect the effects of lime and the development of pozzolanic reactions with time. Lines at 0% lime illustrate the thixotropic hardening, which is very small compared with the gain in strength of the stabilized samples (considering the logarithmic vertical scale).

At time 0, the Saint-Étienne and Jonquière soils are the less resistant, while the two other soils perform quite similarly. After 30 days, the Saint-Hyacinthe soil is the one that is showing the least changes from day 0, whereas the

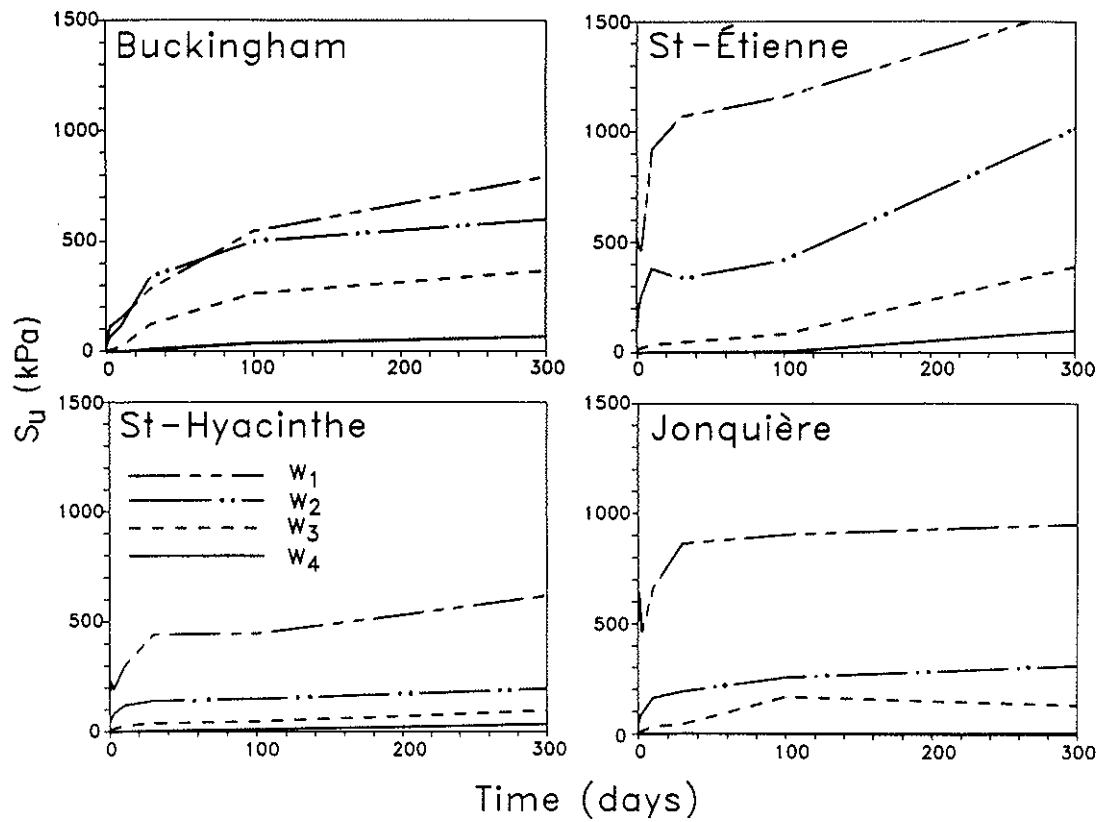


FIG. 5. Shear strength versus time for soils mixed with 4% of quicklime at various water contents.

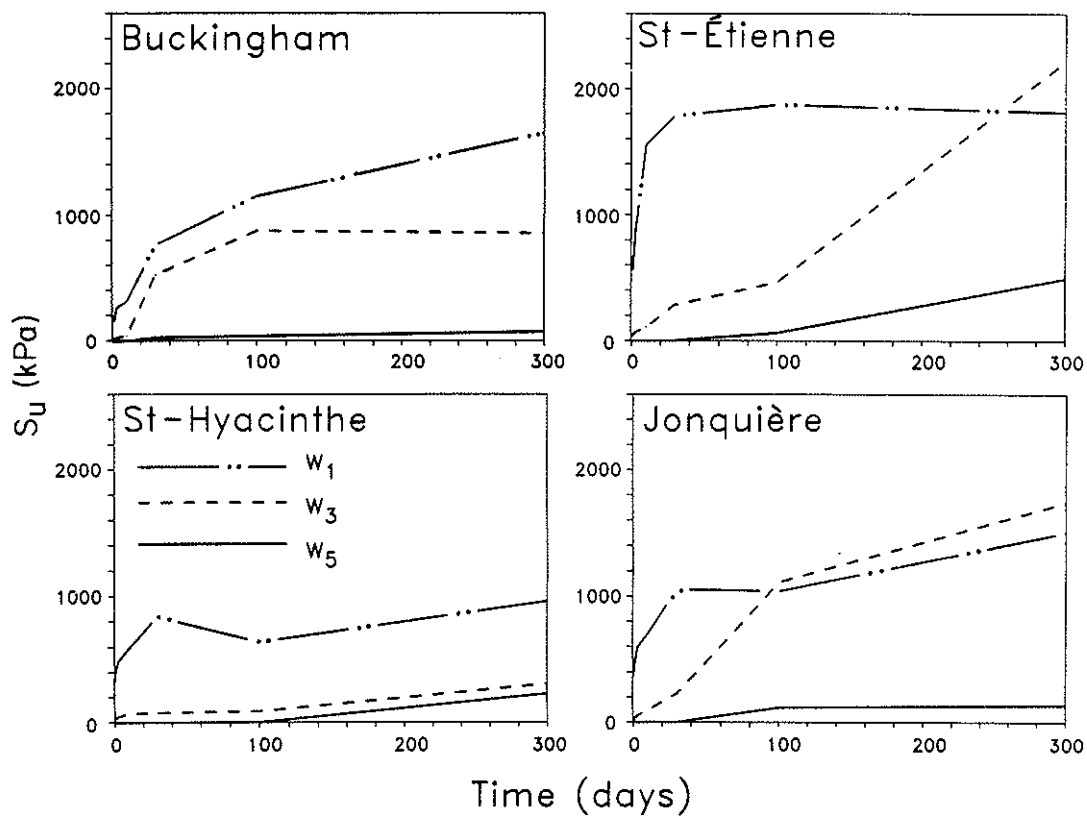


FIG. 6. Shear strength versus time for soils mixed with 10% of quicklime at various water contents.

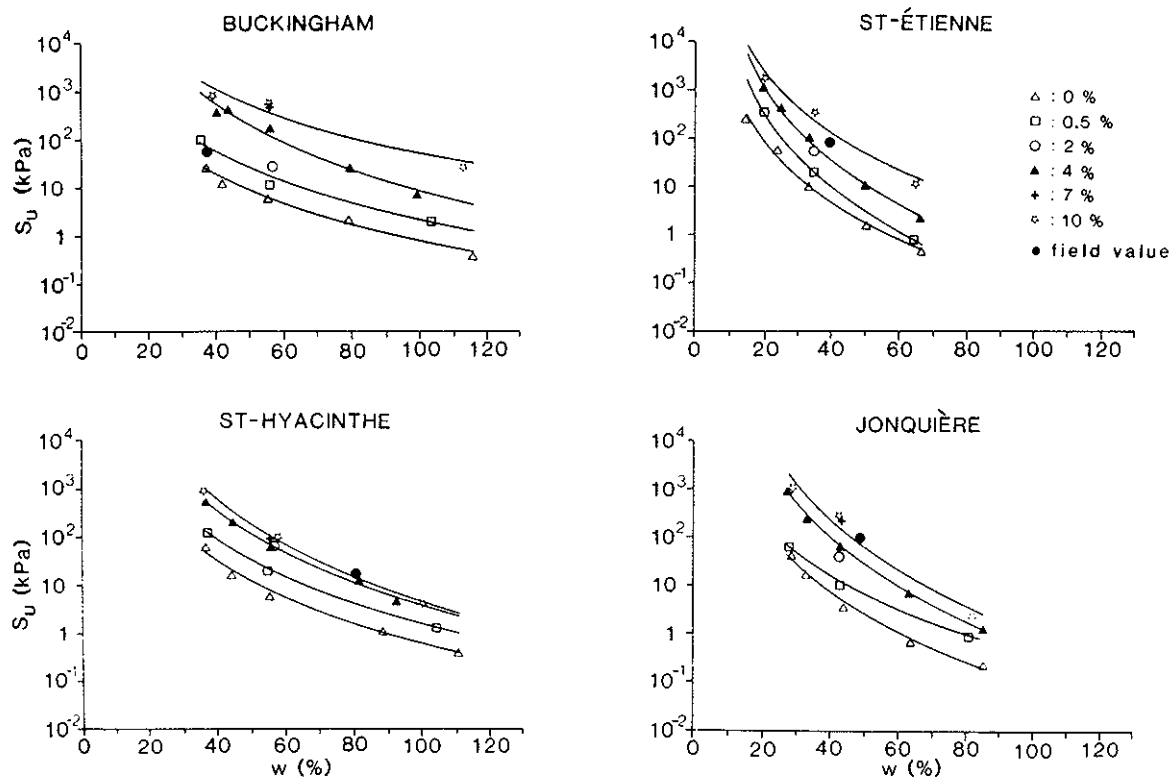


FIG. 7. Results at 30 days of curing time for various amounts of quicklime. Curves are for 0, 0.5, 4, and 10% quicklime. The black dot corresponds to the average actual field conditions.

Buckingham soil is the most reactive (rapid increase in the box height). After 300 days, each soil is showing a strength increase of 1.5–2 orders of magnitude. It is also interesting to observe that differences from one soil to another are reduced with time. The best evidence for this is at a lime concentration of 10% (upper limits of each box) after 300 days.

Discussion

Influence of soil characteristics

The results suggest that the long-term optimum strength obtained, for a given soil, is directly related to molding water content and quicklime concentration (Fig. 8). But how do the soil characteristics influence the reaction mechanisms? The answer is not simple. Soils with comparable liquid limits (Saint-Hyacinthe and Buckingham) did not behave similarly. Choquette (1988), in a study of 18 different soils from Quebec, has shown that the initial controlling reaction parameters are grain size and specific surface area. But with the development of pozzolanic reactions, the mineralogy becomes the only parameter that is positively related to strength development. In comparing only the four soils presented here (Fig. 8) it can only be shown that, at 300 days and 10% quicklime, strength values for each soil are merging. This would tend to indicate that the modifications of soil properties with time lead to a strength development that becomes more uniform.

Another approach is to consider the deleterious factors to lime stabilization. The U.S. Transportation Research Board state of the art report (1987) indicates that organic matter and CO_2 (gas) are reaction inhibitors. Le Roux (1969) and Le Roux and Toubau (1987) identified chlorite, carbonates, and sulfates also as reaction inhibitors. The

above results tend to support these observations. For example, the Buckingham and Saint-Hyacinthe soils have similar index properties (see Table 1), but the latter shows a much lower rate of strength development at almost any condition. This soil differs significantly from the three other soils tested: it has the highest carbonate (10%), organic matter (2%), and chlorite (15%) contents.

Dispersion-diffusion mechanism

It has been argued that as the pozzolanic reactions continue, lime in solution is consumed and more must be dissolved to maintain solution equilibrium. Figures 4, 7, and 8 show that any increase in quicklime concentration (at least up to 10%) is favorable in terms of strength development, despite the fact that less than 0.1% lime is sufficient to saturate the pore-water solution. Also, in addition to the lime content, the dispersion of solid lime in excess seems to have a strong influence on stabilization. Tests reported by Bérubé and Locat (1987) and Choquette (1988) underline that mixing lime with more energy yields higher strength at equivalent lime concentration and time, this being more evident for higher plasticity soils. They observed that a better mixing procedure compensates for the native effect, on the strength of a temperature reduction from 20 to 7°C. Thus, sample preparation is critical on the effectiveness of initial dispersion of solid lime particles. This also stresses the important role of *in situ* mixing and the type of machinery to be used.

A dispersion-diffusion mechanism is considered here to explain the effects of lime concentration and mixing (Stocker 1975; Bryhn *et al.* 1984). During mixing, a given lime dispersion is achieved. When pozzolanic reactions take place and consume lime in solution, equilibrium concentration gradients occur in the pore-water solution between the soil and

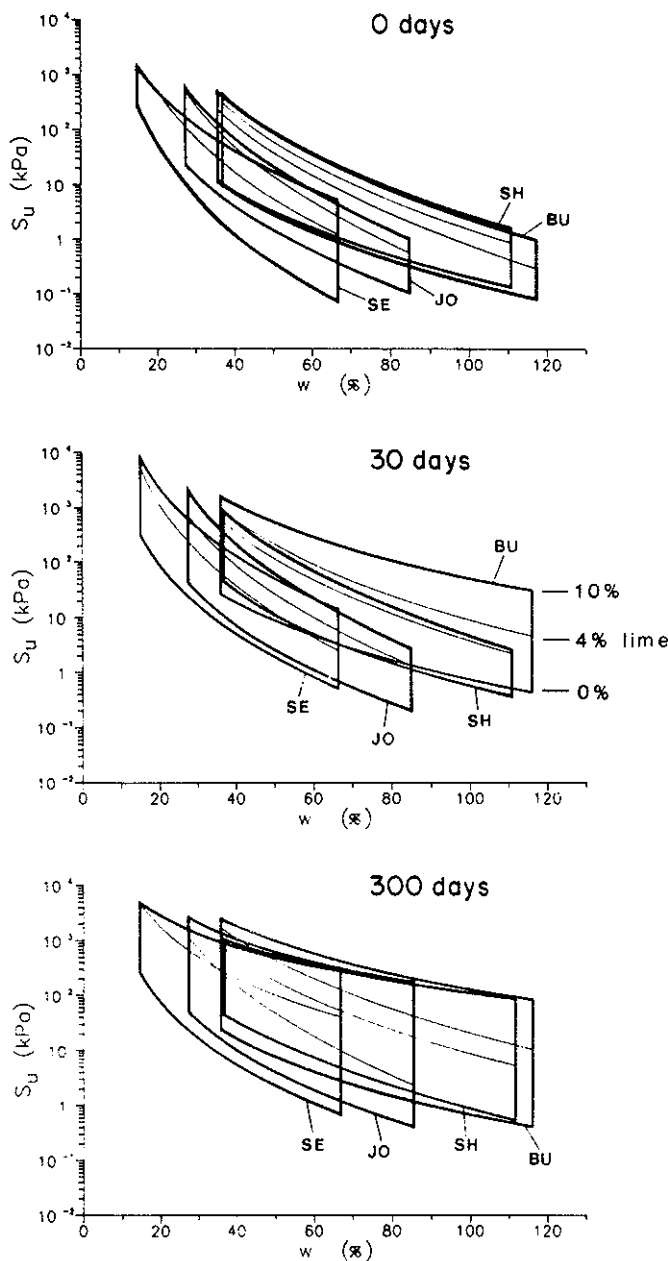


FIG. 8. Summary of results obtained after 0, 30, and 300 days of curing time, and for each soil (SH, Saint-Hyacinthe; BU, Buckingham; JO, Jonquière; SE, Saint-Étienne).

the lime particles to maintain the amount of dissolved lime and the pH at 12.4. So, the higher the lime content and the better the dispersion of it (or mixing), the shorter the average distance between the reacting soil and lime particles, thus producing a more efficient molecular diffusion of calcium within the interconnected and saturated portion of the porous system. Ultimately, the diffusion process can be impeded by precipitates that slowly fill the pore space (Choquette *et al.* 1987; Choquette 1988).

For a soil with high water content (lower density), the lower strength development observed could be partly associated with fewer lime particles per unit volume. On the other hand, the higher the water content, the easier the mixing and the better the dispersion should be. As detailed hereafter, the slower strength increase observed at higher water contents is mostly attributed to the fact that more

cementing products must be produced between the more distant soil particles before there is any significant strength increase.

A schematic model describing the physicochemical process initially proposed by Ingles and Metcalf (1973) and later modified by Choquette (1988) to take into account the results for high water content soils is presented in Fig. 9. This model illustrates how the reaction products are disseminated within the soil matrix, creating bridges (or coating) between or on soil particles. This cementation process is responsible for the increase in strength and acts primarily on the cohesion component of the shear strength parameters of the soil. On the long term, a high water content soil may even perform better than a soil with a low water content, likely because movement of solutes is eased within the porous space (Fig. 9). Cementation related also to structuration: whenever possible, remolded undrained shear strength was measured, and sensitivity has been observed to increase from about 1 or 2, at the beginning, to about 10 after 300 days (Bérubé and Locat 1987).

The analysis of Fig. 9 and mercury porosimetry measurements made by Choquette *et al.* (1987) and Choquette (1988) provide an opportunity to speculate on the effects of lime stabilization on permeability. It is known that the initial flocculation occurring immediately after lime addition tends to produce aggregates (or apparent coarser particles), thus likely increasing the permeability of the soil. If one assumes that the model of Fig. 9 is valid, permeability should decrease as reaction products gradually fill the pore space. This is an important consideration in the use of lime-stabilized clay liners. This question is still open, as little is known about the effects of lime stabilization on the permeability of sensitive clays. However, if the above speculations are right, this should result in greater use of local clayey sediments (e.g., Champlain Sea clays) instead of the expensive imported smectitic clays.

A conceptual view of strength development

The monitoring of strength gain with time at various water contents provides an opportunity to investigate the physical significance of pozzolanic reactions (see Fig. 5). This is best illustrated in the case of high water content samples (Fig. 6), which at 10% quicklime content have experienced a relatively striking strength increase. From the above results and the physical model of Fig. 9, a mechanical model is presented in Fig. 10 that describes the development of strength with time for lime-stabilized clayey soils. Such a model is not perfect but provides a framework to help in interpreting the various results. It is illustrated in Fig. 10 with regards to two different soil-lime mixes: (1) low water content (LWC) mix that can be compacted and (2) high water content (HWC) mix that cannot be compacted. Obviously, intermediate cases are possible. The model proposed by Perret (1977) for silty soils is also presented in Fig. 10 (identified by the letter P). Low water content soils are initially distinguished by a significant shear strength resulting from successful compaction of the sample. This model assumes that strength increase results chiefly from particle bridging by the pozzolanic reaction products (CASH and CSH minerals), for as long as reactants are available. Strength development can be subdivided into three phases with time. Because precipitates have finite dimensions, the greater the initial void ratio (or water content), the more time needed to create

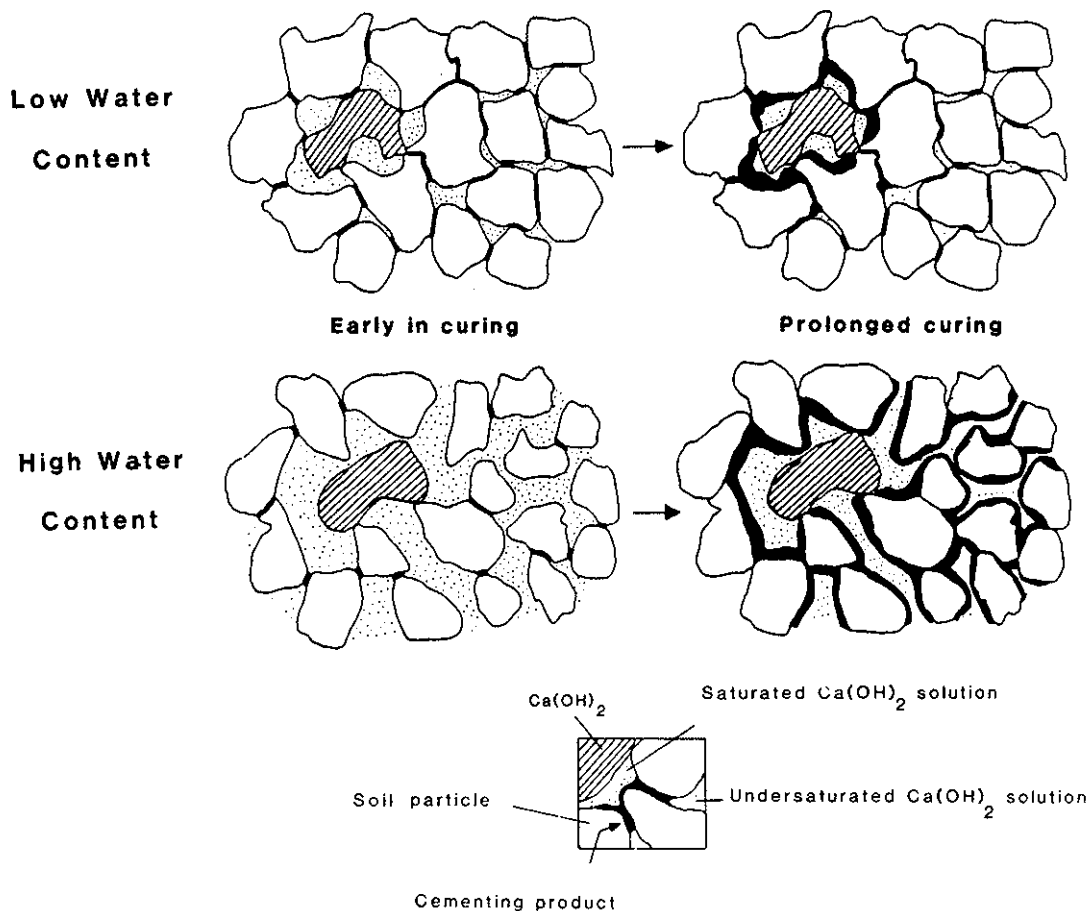


FIG. 9. Physical conceptual model proposed for lime stabilization of sensitive clays (adapted from Ingles and Metcalf 1973).

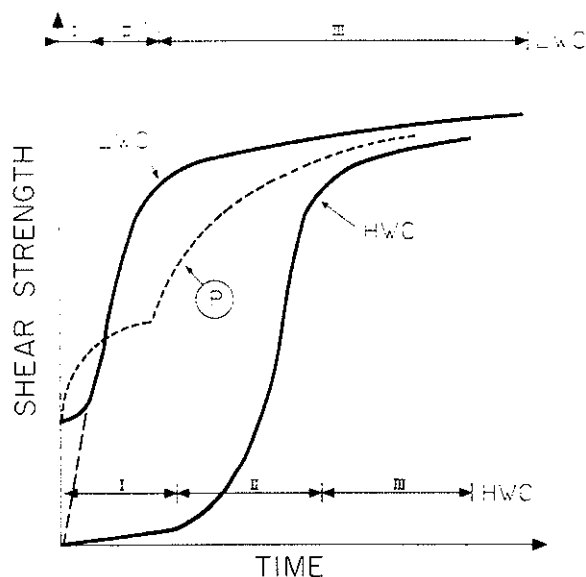


FIG. 10. Mechanical conceptual model of shear strength development with time for high water content (HWC) and low water content (LWC) lime-stabilized clayey soils (P refers to the model of Perret (1977) for silty soils).

significant bridges (or contacts) between soil particles. Figure 10 is adimensional, both HWC and LWC soils tending to reach their ultimate strength with time.

Phase I corresponds to the initial period when bridging is not mechanically felt, even if the chemical reactions are

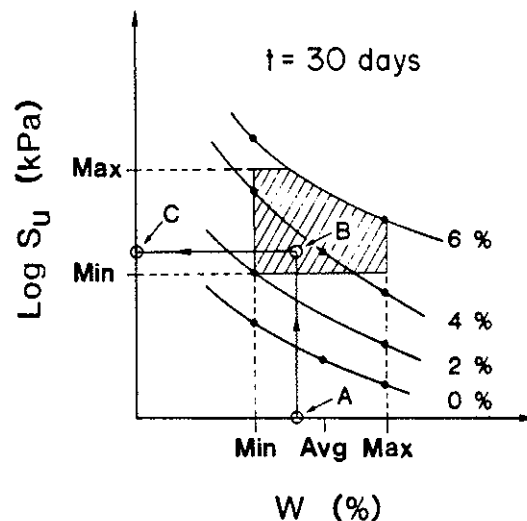


FIG. 11. Laboratory chart proposed for planning lime stabilization projects.

highly active and cements are formed. This is mostly observed for HWC soils (e.g., SE soil in Fig. 6). In a few cases only, this phase is observed for compacted (or LWC) soils, but with a much shorter duration (e.g., BU soil in Fig. 4). At the liquid limit, Saint-Hyacinthe soil, at any quicklime concentration, would not have completed phase I at 300 days.

Phase II is a period of efficient bridging development, when the pozzolanic reactions are mechanically felt as a

sharp increase in strength. During that period, more and more efficient particle or aggregate bonds are created by the neoformed minerals. According to Perret (1977), LWC silty soils may present two phases of strong strength increase (curve P in Fig. 10). Reasons for this are not very clear.

Phase III is characterized by a reduction in the rate of increase of shear strength, or even a levelling (e.g., BU in Fig. 4). Phase III could take place for at least three reasons: (1) completion of pozzolanic reactions due to exhaustion of lime, (2) reactions are still going on but with greater difficulty for solutes to diffuse within the soil-cements matrix, or (3) reaction products are still produced in abundance but their effects on strength are not as pronounced as in phase II, since the soil has already a new, more rigid structure. Precipitation of neoformed minerals may, however, continue to fill the pore space. This is likely to be the case with the Buckingham soil with 7 and 10% of quicklime, after 100 days (Fig. 4), as lime is still present in the soil (Choquette *et al.* 1987). The Jonquière soil also presents a similar behavior at water contents of W_1 and W_2 (Fig. 5) and with only 4% of quicklime. Further permeability measurements on stabilized soils would help to verify this point. However, the modification of the pore space has been well shown by means of mercury porosimetry (Choquette *et al.* 1987; Choquette 1988), which confirms a sharp reduction of inter-aggregate pores to the benefit of smaller pores, as a result of their partitioning by neoformed minerals with their own very fine porosity.

With the mechanical model just presented, laboratory results can be interpreted. For example, many HWC samples mixed with 7 or 10% quicklime were not able to complete phase II within 300 days (see Figs. 5 and 6). For HWC soils, it is clear that enough time must be provided to obtain a significant shear strength increase. This may explain why Bryhn *et al.* (1984) found that the Saint-Léon clay (from Quebec) barely recuperated its *in situ* strength after addition of 4% of quicklime: in this case, the 30 days of curing time was likely not enough to reach phase II. Indeed, for most of the sensitive clays stabilized in this study with 4% quicklime at the liquid limit, *in situ* strength values were reached and exceeded only after about 50 days or more, and much higher strength values were obtained afterwards.

An experimental laboratory chart

Planning a stabilization project is not trivial. To help, a laboratory experimental chart is proposed hereafter (Fig. 11). This chart is established on the assumption that [4] applies, so that the number of samples can be limited.

Field conditions are given as minimum and maximum water contents, strength, and temperature. The selection of the curing temperature is quite important. In fact, it should be as close as possible to the average field value. The black dots in Fig. 11 correspond to the molding water contents selected for a given type of soil and site. Fewer than 12 samples are needed if strength can be measured by means of a celerometer (Locat *et al.* 1986) or by some other nondestructive method. If such an instrument is not available, than 50–60 samples would be needed to measure strength development with time. At any time, a chart like the one in Fig. 11 can be built. Then, for a given field water content (point A in Fig. 11), a target strength (point C in Fig. 11) can be chosen for that time, and the lime content can be obtained (point B in Fig. 11).

The use of laboratory results for selecting field design parameters is still very uncertain. Little data is available on field strength values of stabilized sensitive clays. Bryhn *et al.* (1984) have found that, over a period of about 30 days, only half of the laboratory strength could be obtained in the field. So far, no correlation has been found that relates laboratory results to field measurements. This will be difficult to achieve, as results are very sensitive to mixing procedures. Work is needed on field cases and on the effects of field conditions on both short- and long-term behavior of lime-stabilized clayey soils. Aspects such as freezing and thawing cycles, wetting and drying cycles, dynamic response, and field control methods are a few examples of areas where future work is needed for the better understanding of lime stabilization of sensitive clays.

Conclusions

As one can observe, quicklime addition to a soil causes reactions that are difficult to understand or predict immediately, since many parameters have to be interpreted in the analysis. The main conclusions that come from this work are the following:

- (1) All the soils tested reached a significant strength level when enough time or quicklime is provided.
- (2) High water content soils can be successfully stabilized with quicklime. In this case, time is a critical factor.
- (3) The better the mixing, the better the dispersion of quicklime will be. With a shorter average distance between a lime particle and a reactive mineral particle, a more complete reaction is possible.
- (4) The relationship between shear strength and water content, at any quicklime content, follows a power law ([4]).
- (5) Physical and mechanical conceptual models have been proposed that illustrate the development of a cementation process by means of pozzolanic reactions between quicklime and mineral particles.
- (6) Work is needed on field-scale lime stabilization, and on the effects of freezing and thawing, wetting and drying, and dynamic solicitations on the long-term behavior of stabilized soils.

Acknowledgments

This research was supported by the ministère des Transports du Québec with the very enthusiastic collaboration of P.-A. Brochu, L. Tanguay, and P. de Montigny. Large parts of the research were also funded through a grant from the Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (actions spontanées). The collaboration of many was essential to the success of this project: N. Beauséjour, A. Masson, L. Blais-Leroux, S. Goulet, and many others. We would like to take this opportunity to thank Dr. R. M. Quigley for his very important initial guidance in this project. The assistance and discussions within the Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur was greatly appreciated.

- BÉRUBÉ, M.A., and LOCAT, J. 1987. Stabilisation à la chaux des argiles sensibles: rôle de la nature du sol. Ministère des Transports du Québec, Final Report GGL-87-03.
- BROCHU, P. 1980. Utilisation de la chaux dans les projets routiers. Ministère des Transports du Québec, Service des Sols et Chaussées.

- BROMS, B.B., and BOMAN, P. 1979. Lime columns—a new foundation method. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **105**: 539–556.
- BRYHN, O.R., LOKEN, T., and ASS, G. 1984. Stabilization of sensitive clays with hydroxy-aluminum compared with unslaked lime. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Publication 151.
- CHOQUETTE, M. 1988. La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec. Ph.D. thesis, Department of Geology, Université Laval, Québec, Que.
- CHOQUETTE, M., BÉRUBÉ, M.-A., and LOCAT, J. 1987. Mineralogy and microstructural changes associated with lime stabilization of marine clays from Eastern Canada. *Applied Clay Science*, **2**: 215–232.
- DIAMOND, S., and KINTER, E.B. 1965. Mechanism of soil-lime stabilization: an interpretative review. Presentation at the 44th Annual Meeting, Highway Research Board, Washington.
- DIAMOND, S., WHITE, J.L., and DOLCH, W.L. 1964. Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. *Proceedings, 12th National Conference on Clays and Clay Minerals*, pp. 359–379.
- EADES, J.L., and GRIM, R.E. 1960. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Board, Bulletin 262*, pp. 51–63.
- . 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *In* Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Record*, No. 139, pp. 61–72.
- EADES, J.L., NICHOLS, F.P., JR., and GRIM, R.E. 1962. Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. *Highway Research Board, Bulletin 335*, pp. 31–39.
- ESTÉOULE, J., and PERRET, P. 1979. Le traitement des sols fins par la chaux. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No. 69, pp. 99–118.
- GLENN, G.R., and HANDY, R.L. 1963. Lime-clay mineral reaction products. *Highway Research Record*, No. 29, pp. 70–82.
- HERZOG, A., and MITCHELL, J.K. 1963. Reactions accompanying stabilization of clays with cement. *Highway Research Record*, No. 36, pp. 146–171.
- HILT, G.H., and DAVIDSON, D.T. 1960. Lime fixation in clayed soils. *Highway Research Board, Bulletin 262*, pp. 20–32.
- INGLES, O.G., and METCALF, J.B. 1973. *Soil stabilization*. Wiley and Sons, New York.
- LE ROUX, A. 1969. Traitement des sols argileux par la chaux. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No. 40, pp. 59–95.
- LE ROUX, A., and TOUBEAU, Ph. 1987. Mise en évidence du seuil de nocivité et du mécanisme d'action des sulfures au cours d'un traitement à la chaux. 9th South East Asian Geotechnical Conference, Bangkok.
- LOCAT, J., and BEAUSÉJOUR, N. 1987. Corrélations entre des propriétés mécaniques dynamiques et statiques de sols argileux intacts et traités à la chaux. *Canadian Geotechnical Journal*, **24**: 327–334.
- LOCAT, J., LEFEBVRE, G., and BALLIVY, G. 1984. Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from Eastern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, **21**: 530–540.
- LOCAT, J., BEAUSÉJOUR, N., and BÉRUBÉ, M.-A. 1986. Utilisation du céléromètre ultrasonique sur des sols cohérents. *Canadian Geotechnical Journal*, **23**: 247–250.
- MACHAM, L.R., DIAMOND, S., and LEO, E. 1977. Laboratory study of the effectiveness of cement and lime stabilization for erosion control. *Transportation Research Record*, No. 641, pp. 24–28.
- MASSON, A., CHOQUETTE, M., BÉRUBÉ, M.-A., and LOCAT, J. 1986. Compilation et mise à jour des données brutes sur les effets de la stabilisation à la chaux des argiles de l'est du Canada. Department of Geology, Université Laval, Report GGL-86-33.
- ORMSBY, W.C., and KINTER, E.B. 1973. Effects of dolomitic and calcitic limes on strength development in mixtures with two clay minerals. *Public Roads*, **37**: 149–160.
- PERRET, P. 1977. Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux: étude globale du phénomène et applications. Doctoral thesis, Institut national des sciences appliquées, Rennes, France.
- PERRY, J.P. 1977. Lime treatment of dams constructed with dispersive clay soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **20**: 1093–1099.
- PETTRY, D.E., and RICH, C.I. 1971. Modification of certain soils by calcium hydroxide stabilization. *Soil Science Society of America Proceedings*, **35**: 834–838.
- PUIATTI, D., PUIG, J., and SCHAEFFNER, M. 1983. Traitement des sols à la chaux aérienne et aux ciments. *In* Méthodologie des études de laboratoire. *Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Paris, pp. 123–142.
- QUEYROI, D., CHAPUT, D., and PILOT, G. 1985. Amélioration des sols de fondation: choix des méthodes d'exécution. Note d'Information Technique—Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- QUIGLEY, R.M., and DIELEMANS, H.J. 1982. Lime stabilization of weathered surface clays of Southeastern Ontario. Ontario Ministry of Transportation and Communications, Research Report RR-215.
- QUIGLEY, R.M., and DINARDO, L. 1982. Soil-cement and soil-lime stabilization of weathered surface clays in Southwestern Ontario. Ontario Ministry of Transportation and Communications, Research Report RR-232.
- SLOANE, R.L. 1965. Early reaction determination in two hydroxide-kaolinite systems by electron microscopy and diffraction. *Proceedings, 13th National Conference on Clays and Clay Minerals*, pp. 331–339.
- STOCKER, P.T. 1975. Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils—chemical aspects. *Australian Road Research*, **5**: 6–47.
- U.S. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. 1987. State of the art report 5: lime stabilization, reactions, properties, design and construction. *Edited by L. Chou*. U.S. Transportation Research Board, Washington, DC.

ANNEXE III

Prévision des tassements de l'aménagement retenu selon quatre hypothèses sur la nature des fonds du lac Saint-Pierre

Ce document présente une évaluation des tassements anticipés pour la partie îlot de l'aménagement selon quatre hypothèses sur la nature des fonds du lac.

Les paramètres utilisés pour le calcul des tassements ont été obtenus à partir des études géotechniques portant les numéros 1953-0-1 et 1953-2-1 réalisées par Terratech en 1988 pour Travaux publics Canada. Les paramètres des essais de consolidation réalisés à partir des forages G, F, I et J de l'étude 1953-0-1 ont été combinés afin d'obtenir des valeurs représentatives des sols en place. Toutefois, il faut mentionner que les études de Terratech se sont limitées aux vingt mètres du dépôt d'argile.

De plus, l'article publié par L. Samson et R. Garneau, intitulé "Settlement performance of two embankments on deep compressible soils" (Can. Geotech. J. 10 : 211-226, 1973) a aussi été utilisé. Cet article traite du secteur de Berthierville.

Pour les besoins des calculs, l'îlot a été divisé en deux parties (coupe A et coupe B) à partir du centre de l'îlot principal.

Coupe A (îlot principal et palier).- Pour cette portion de talus, une pente uniforme de 20 à l'horizontale pour 1 à la verticale a été utilisée depuis la bordure de l'îlot principal jusqu'au fond de l'eau (voir coupe A en annexe).

Coupe B (îlot principal sans palier).- Pour cette portion du talus, une pente uniforme de 10 à l'horizontale pour 1 à la verticale a été utilisée depuis la bordure de l'îlot principal jusqu'au fond de l'eau (voir coupe B en annexe).

Lors de la réalisation des calculs, les quatre scénarios suivants ont été utilisés :

Scénario 1

Pour ce premier scénario, une épaisseur d'argile de 60 m se drainant des deux côtés (chemin de drainage de 30 m) a été considérée et les coefficients de consolidation, C_v , de Terratech ont été utilisés pour déterminer la période de consolidation.

Scénario 2

Dans ce deuxième scénario, une épaisseur d'argile de 60 m a été considérée. Le temps nécessaire à l'accomplissement de 95 % des tassements a été établi à 100 ans, compte tenu de la présence de lits de sable dans le dépôt d'argile, lesquels devraient accélérer le processus de consolidation.

Scénario 3

Selon les résultats de forages réalisés antérieurement dans le secteur à l'étude, le socle rocheux semble se situer entre 75 et 90 m de profondeur. Pour ce scénario, une épaisseur d'argile de 90 m a été considérée. Le temps nécessaire à l'accomplissement de 95 % des tassements a été établi à 100 ans pour les raisons établies ci-dessus.

Scénario 4

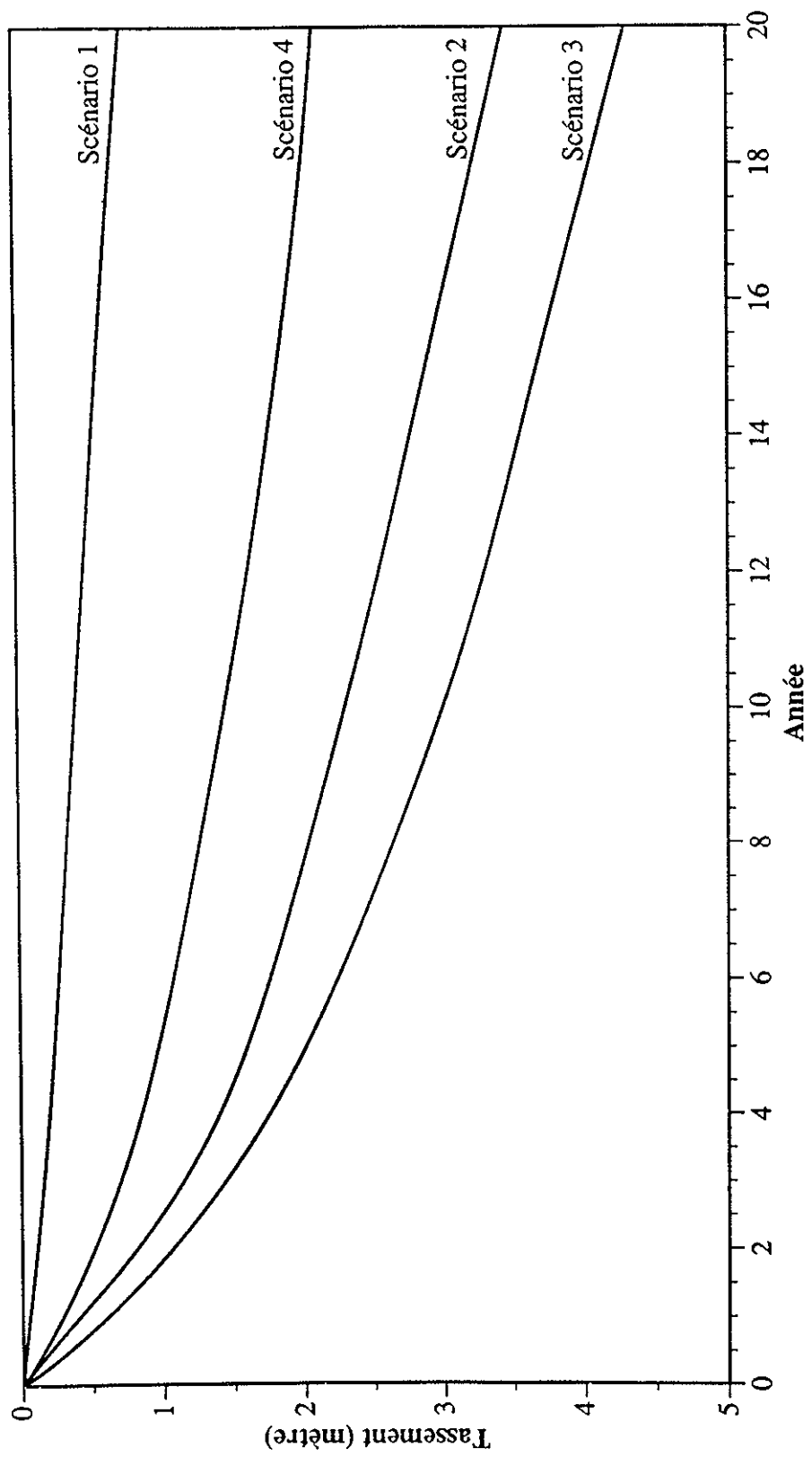
Selon les résultats présentés par Samson et Garneau, l'argile du secteur à l'étude est normalement consolidée dans les vingt premiers mètres, tandis qu'au delà de cette profondeur, le dépôt d'argile montre une surconsolidation de 80 kiloPascals. Pour ce scénario, une épaisseur d'argile compressible de 20 m a donc été considérée. Le temps nécessaire à l'accomplissement de 95 % des tassements a été établi à 100 ans pour les raisons établies précédemment.

Résultats

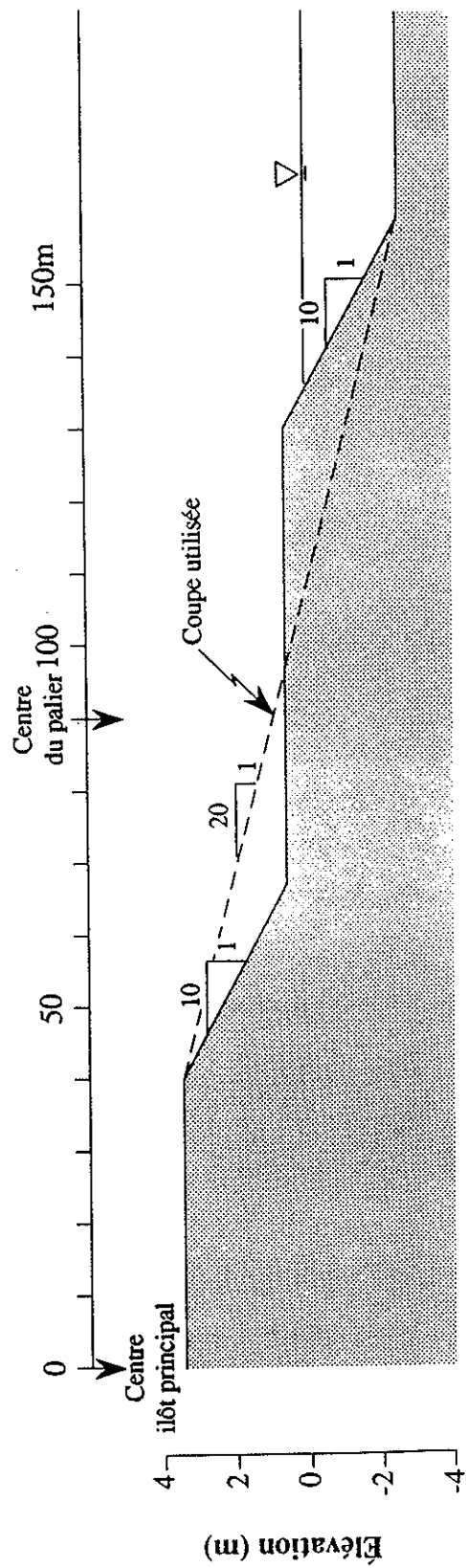
Les quatre scénarios réalisés nous ont permis d'anticiper les tassements suivants :

Scénario	Tassements totaux (m)	Tassements sur 20 ans (m)
1	3,75	0,75
2	6,1	3,40
3	6,1	4,20
4	7,5	2,10

Les courbes présentées en annexe montrent la progression des tassements en fonction du temps.



Coupe A (îlot + palier)



Coupe B (îlot sans palier)

