

Record Number:

Author, Monographic: Leclerc, M.//Dhatt, G.//Ouellet, Y.//Matte, Y.//Bellemare, J. F.//Talbot, M. Soulaïmani, A.//Dupuis, P.//Desjardins, L.//Robert, J. L.//Allah, S. H. Chaprentier, R.//Tremblay, D.//Gagnon, M.//Martel, J. P.//Tessier, J. C.

Author Role:

Title, Monographic: Projet Archipel - Simulation des conditions abiotiques actuelles et futures du lac Saint-Louis, du bief d'amenée et du bassin La Prairie

Translated Title:**Reprint Status:****Edition:****Author, Subsidiary:****Author Role:**

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau

Date of Publication: 1986

Original Publication Date: Juin 1985

Volume Identification:

Extent of Work: xii, 94

Packaging Method: pages

Series Editor:**Series Editor Role:**

Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche

Series Volume ID: 191

Location/URL:

ISBN: 2-89146-189-4

Notes: Rapport annuel 1985-1986

Abstract: Rapport rédigé pour Hydro-Québec et distribué par TAO Simulations

Call Number: R000191

Keywords: rapport/ ok/ dl

PROJET ARCHIPEL -
SIMULATION DES CONDITIONS
ABIOTIQUES ACTUELLES
ET FUTURES DU
LAC SAINT-LOUIS, DU
BIEF D'AMENÉE ET DU
BASSIN LA PRAIRIE

POUR HYDRO-QUÉBEC
DIRECTION ENVIRONNEMENT

RAPPORT # TAO-85-03
INRS-Eau RS-191
CRANI-85-03

JUIN 1985

LISTE DES PARTICIPANTS

Michel Leclerc	Chargé de projet
Gouri Dhatt	Responsable scientifique et président de TAO Simulations Inc.
Yvon Ouellet	Conseiller scientifique et directeur du CRANI
Yves Matte	Responsable du pré-traitement des données et adjoint à la gestion du projet
Jean-François Bellemarre	Modélisation hydrodynamique
Martin Talbot	Modélisation hydrodynamique
Azzedine Soulaïmani	Conseiller en modélisation et auteur du modèle d'éléments finis
Pierre Dupuis	Développement du logiciel d'infographie HYGRAF
Louis Desjardins	Développement du logiciel d'infographie HYGRAF
Jean-Loup Robert	Modèle de mélange des eaux et MOSAIC
Samer Hamad Allah	Pré-traitement des données et modélisation hydrodynamique
Richard Charpentier	Sorties graphiques
Diane Tremblay	Simulations du mélange des eaux
Monique Gagnon	Secrétaire administrative
<u>Pour Hydro-Québec</u>	
Jean-Paul Martel	Coordination générale
Jean-Claude Tessier	Coordination scientifique

REMARQUE PRÉLIMINAIRE

Cette étude, menée sous la gouverne de la Société TAO Simulations inc. est le résultat d'une riche collaboration interinstitutionnelle au sein de laquelle ont été impliqués le CRANI (Centre de recherche et d'applications numériques en ingénierie), le département de génie civil de l'Université Laval et l'Institut national de la recherche scientifique-Eau. Que ce soit au niveau des équipements, de la gestion de projets, de l'expertise scientifique, ou de la formation de personnel qualifié, ces diverses institutions ont fait preuve d'un grand esprit de collaboration dans le but de favoriser le transfert de l'expertise technologique universitaire vers le milieu industriel. La Société TAO Simulations inc. tenait à les remercier comme il se doit à ce stade-ci du rapport.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
LISTE DES PARTICIPANTS	ii
REMARQUE PRÉLIMINAIRE	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
 CHAPITRE I:	
1.0 Cadre de l'étude	1
1.1 Problématique.	1
1.2 Objectifs de l'étude	5
 CHAPITRE II:	
2.0 Méthodologie	9
2.1 Modèle mathématique.	9
2.1.1 Modèle hydrodynamique (MEFLU)	9
2.1.2 Modèle de transport-diffusion	12
2.1.3 Conditions aux limites	13
2.2 Modèle numérique hydrodynamique	15
2.2.1 Forme variationnelle	15
2.2.2 Forme discrétisée	16
2.2.3 Méthode de résolution	18
2.2.4 MEFLU en bref	20
2.3 Modèle numérique de transport-diffusion	21
2.3.1 Le problème	21
2.3.2 Discrétisation de la forme intégrale	21
2.3.3 Résolution	22
2.4 Cheminement de la méthode	23

CHAPITRE III:

3.0	Données de base et choix des paramètres	25
3.1	Conditions d'hydraulicité	25
3.2	Maillage	31
3.2.1	Lac Saint-Louis	38
3.2.2	Le bief d'amenée	38
3.2.3	Bassin La Prairie	39
3.3	Bathymétrie	39
3.4	Choix des paramètres	40
3.4.1	Procédure	40
3.4.2	Perte de charge - frottement	40
3.4.3	Choix des paramètres de mélange	50
3.4.4	Relations niveaux-débits	51

CHAPITRE IV:

4.0	Présentation des résultats	59
4.1	Calibration	59
4.1.1	Modèle hydrodynamique - principe	59
4.1.2	Mélange des eaux - principe	60
4.1.3	Estimation du débit	61
4.2	Lac Saint-Louis	62
4.2.1	Hydrodynamique	62
4.2.2	Mélange des eaux	64
4.3	Bief d'amenée	67
4.3.1	Hydrodynamique	67
4.3.2	Mélange des eaux	68
4.4	Bassin La Prairie	68
4.4.1	Hydrodynamique	68
4.4.2	Mélange des eaux	69

4.5	Prédiction	71
4.5.1	Hydrodynamique	71
4.5.2	Mélange des eaux	73
4.6	Inventaire des modifications aux conditions abiotiques	74
4.6.1	Critère biologique	75
4.6.2	Critère humain	75
4.6.3	Critère de glace	78
BIBLIOGRAPHIE		80

ANNEXES

ANNEXE I	Modification du modèle variationnel pour prendre en compte une bathymétrie discontinue	82
ANNEXE II	Formulation variationnelle du modèle de transport-diffusion par une méthode de type Taylor-Galerkine	85
ANNEXE III	Calcul du débit - méthode du "trapèze" (extrait de TAO Simulations Inc., 1985a)	88
ANNEXE IV	Quelques conditions de référence pour la calibration du modèle hydrodynamique dans le lac Saint-Louis	90

ANNEXES GRAPHIQUES:

CODES DE DÉSIGNATION DES ANNEXES GRAPHIQUES

Les annexes graphiques apparaissent sous la forme d'images obtenues sur imprimante ou captées sur diapositives. Dans les deux cas, elles sont désignées avec le code et dans l'ordre suivant:

LSL.A	Lac Saint-Louis	- actuel
LSL.F	Lac Saint-Louis	- futur
BAM.A	Bief d'aménée	- actuel
BAM.A	Bief d'aménée	- futur
LPR.A	Bassin La Prairie	- actuel
LPR.FI	Bassin La Prairie	- futur (scénario i)

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>
Figure 1: Ensemble de la région à l'étude	2
Figure 2: Zone à l'étude, Lac Saint-Louis	3
Figure 3: Zone à l'étude, bief d'amenée à la centrale	4
Figure 4: Zone à l'étude, bassin La Prairie	6
Figure 5: Conventions du modèle bi-dimensionnel	11
Figure 6: Conditions aux limites du modèle hydrodynamique	14
Figure 7: Discrétisation par éléments finis et approximation des variables	16
Figure 8: Résumé de la méthode numérique	19
Figure 9: Transformation du maillage hydrodynamique pour le transport-diffusion	22
Figure 10: Cheminement global de la méthode	24
Figure 11: Maillage du lac Saint-Louis	32
Figure 12: Maillage du bief d'amenée - conditions actuelles	33
Figure 13: Maillage du bief d,amenée - conditions futures	34
Figure 14: Maillage du bassin La Prairie - conditions actuelles	35
Figure 15: Maillage du bassin La Prairie - conditions futures (scénario 1)	36
Figure 17a: Zones de frottement distinctes pour le "n" de Manning dans le bief d'amenée (adapté de R.S.W., 1983)	44
Figure 17b: Zones de frottement distinctes aux ouvrages dans le bief d'amenée	45
Figure 18: Définition des sections de R.S.W. (1983) pour le choix des coefficients de Manning "n" - bief d'amenée	46

Figure 19:	Zones de frottement distinctes dans le bassin de La Prairie a) Conditions actuelles b) Conditions futures (scénario 1)	48
Figure 19c:	Définition des sections de R.S.W. (1983) pour le choix du "n" de Manning dans le bassin La Prairie	49
Figure 20:	Relations niveau-débit actuelles aux extrémités du lac Saint-Louis (adapté de R.S.W., 1983)	53
Figure 21:	Relations niveau-débit actuelles aux extrémités du bief d'amenée (d'après les courbes de remous de R.S.W., 1983)	54
Figure 22:	Relations niveau-débit actuelles aux extrémités du bassin La Prairie (d'après les courbes de remous de R.S.W., 1983)	55
Figure 23:	Comparaison des lignes de partage des eaux de l'Outaouais et du Saint-Laurent d'après des images Landsat et nos simulations	66
Figure 24:	Conditions de référence du mélange des eaux dans le bief d'amenée et le bassin La Prairie (débit 9 207 m ³ /s)	70
Figure A1.1:	Bathymétrie discontinue et approximation de la géométrie constante par élément	83
Figure A3.1:	Calcul du débit par la méthode du "trapèze"	88
Figure A4.1a:	Illustration du tourbillon observé le 7 octobre 1980 à droite du courant de sortie de la centrale Beauharnois - débit d'environ 11,000 m ³ /s (cité par Carballada, 1982)	91
Figure A4.1b:	Illustration du tourbillon observé le 7 octobre 1980 à droite du courant de sortie de la centrale Beauharnois - débit d'environ 11,000 m ³ /s (cité par Carballada, 1982)	92
Figure A4.2:	Illustration du champ de vitesse de surface obtenu sur modèle réduit dans le bief d'aval du lac Saint-Louis en face de l'île Saint-Bernard - débit module (cité par Carballada, 1982)	93
Figure A4.3:	Illustration du champ de vitesse de surface obtenu sur modèle réduit dans le bief du chenal Vaudreuil - débit module (cité par Carballada, 1982)	94

CODE DE DÉSIGNATION DES IMAGES DANS LES ANNEXES GRAPHIQUES

Chaque image est désignée par le code de l'annexe où elle se trouve auquel s'ajoute une extension alphabétique ou un numéro. Celles-ci ont toujours la même signification peu importe le contexte.

Extensions

.BAT : bathymétrie
.MAI : maillage
.PER : domaine en perspective
.ETI. A OU B : étiage décennal, partage des débits A ou B
.MOD : module interannuel
.CR10. A ou B : crue décennale, partage A ou B
.CR100.A ou B : crue centennale, partage A ou B

Codes numériques

.01 : champ de vitesses et trajectoires d'écoulement
.02 : hauteur relative de l'eau
.03 : profondeur totale
.04 : intervalles de vitesse (critère de glace)
.05 : mélange des eaux
.06 : intersections de conditions abiotiques
(critère biologique)
.07 : intersections de conditions abiotiques
(critère humain)

Code de désignation des diapositives

Par mesure d'efficacité, nous avons adopté une numérotation simplifiée pour les diapositives:

Les diapositives sont d'abord regroupées en trois groupes de deux annexes, chacun correspondant à un domaine (actuel et futur). Chaque groupe fait usage d'un code de désignation composé d'une lettre donnée dans l'ordre alphabétique et d'un chiffre entre 1 et 9.

Lac Saint-Louis

A 1 à 5 : état actuel, général
B 1 à 7¹ : état actuel, étiage, partage A
C 1 à 7 : état actuel, étiage, partage B

¹ L'ordre correspond au code numérique des images-papier.

Lac Saint-Louis (suite)

D	1 à 7	: état actuel, module
E	1 à 7	: état actuel, crue décennale, partage A
F	1 à 7	: état actuel, crue décennale, partage B
G	1 à 7	: état actuel, crue centennale, partage A
H	1 à 7	: état actuel, crue centennale, partage B
I	1 à 7	: état futur, général
J	1 à 7	: état futur, étiage, partage A
K	1 à 7	: état futur, étiage, partage B
L	1 à 7	: état futur, module
M	1 à 7	: état futur, crue décennale, partage A
N	1 à 7	: état futur, crue décennale, partage B
O	1 à 7	: état futur, crue centennale, partage A
P	1 à 7	: état futur, crue centennale, partage B

Bief d'amenée

A	1 à 5	: état actuel, général
B	1 à 7	: état actuel, étiage décennal
C	1 à 7	: état actuel, module
D	1 à 7	: état actuel, crue décennale
E	1 à 7	: état actuel, crue centennale
F	1 à 5	: état futur, général
G	1 à 7	: état futur, étiage décennal
H	1 à 7	: état futur, module
I	1 à 7	: état futur, crue décennale
J	1 à 7	: état futur, crue centennale

Bassin La Prairie

A	1 à 5	: état actuel, général
B	1 à 7	: état actuel, étiage décennal
C	1 à 7	: état actuel, module
D	1 à 7	: état actuel, crue décennale
E	1 à 5	: état futur, général
F	1 à 7	: état futur, étiage décennal
G	1 à 7	: état futur, module
H	1 à 7	: état futur, crue décennale

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>
Tableau 1a: Conditions d'hydraulicité typiques du lac Saint-Louis (en m ³ /s)	26
Tableau 1b: Conditions d'hydraulicité futures typiques du lac Saint-Louis (en m ³ /s)	27
Tableau 2: Conditions d'hydraulicité typiques actuelles et futures du bief d'amenée	28
Tableau 3: Conditions d'hydraulicité typiques actuelles et futures du bassin La Prairie	29
Tableau 4: "n" de manning pour le bief d'amenée selon l'hydrau- licité (voir figures 17 et 18)	43
Tableau 5: "n" de Manning pour le bassin La Prairie selon l'hydraulicité (voir figures 19a, 19b et c)	47
Tableau 6: Niveaux-cibles en conditions actuelles et futures - Lac Saint-Louis	56
Tableau 7: Niveaux-cibles actuels et futurs - bief d'amenée (adapté de R.S.W., 1983 ou proposé dans le plan de gestion futur)	57
Tableau 8: Niveaux-cibles actuels et futurs - bassin La Prairie .	58
Tableau 9: Comparaison des niveaux mesurés et simulés à Pointe-Claire lac Saint-Louis	63
Tableau 10: Conditions d'hydraulicité du lac Saint-Louis aux dates indiquées des images LANDSAT de référence (rapporté par Côté, 1983)	65
Tableau 11: Conditions d'hydraulicité du lac Saint-Louis pour fins de calibration du mélange des eaux	65
Tableau 12: Comparaison des résultats du modèle avec les niveaux- cibles pour le bief d'amenée - au pont Mercier (station 001005)	67

Tableau 13:	Comparaison des résultats du modèle avec les niveaux-cibles pour le bassin La Prairie - à l'estacade (00087)	69
Tableau 14:	Intervalles de valeurs du critère biologique	76
Tableau 15:	Intervalles de valeurs du critère humain	77

1.0 CADRE DE L'ÉTUDE

1.1 PROBLÉMATIQUE

Le projet d'aménagement des ressources hydriques de l'Archipel de Montréal est susceptible d'entraîner des modifications significatives du régime hydrologique, hydrographique, hydro-géochimique et hydrobiologique des plans d'eau de cette région. Le mandat de cette étude concerne plus spécifiquement la région dite sud-est, (figure 1) c'est-à-dire, le lac Saint-Louis, le bief d'amenée de la future centrale sise à l'amont des rapides de Lachine et le bassin de La Prairie. L'hydro-Québec nous a mandatés pour analyser les changements biophysiques de ces différents milieux à l'aide du modèle numérique d'éléments finis MEFLU.

La nature des changements proposés pour ces plans d'eau varie considérablement de l'un à l'autre. Le lac Saint-Louis (figure 2) situé à l'amont de la zone à l'étude devrait voir son niveau régularisé pendant les périodes de crue et d'étiage. Pendant l'étiage, le niveau du lac sera mieux soutenu de manière à favoriser les activités récréatives; les crues au contraire devraient être plus importantes mais transitées plus efficacement à un niveau plus bas afin de diminuer les dommages par inondations dans d'autres régions de l'Archipel.

La répartition des apports hydrologiques va donc être modifiée, en particulier, pour ce qui est des débits en provenance de l'Outaouais par le chenal Sainte-Anne. Ces changements devraient résulter en des modifications de la configuration des courants, de la profondeur d'eau et du régime de mélange des eaux de l'Outaouais et du Saint-Laurent.

Le bief d'amenée (figure 3), pour sa part, sera grandement influencé par la présence de deux aménagements importants: la future centrale à l'amont des rapides de Lachine avec ses ouvrages de régularisation et d'évacuation de crues exceptionnelles d'une part, et le creusement d'un canal longitudinal en face de la jetée Lachine à l'amont du bief. Le premier type

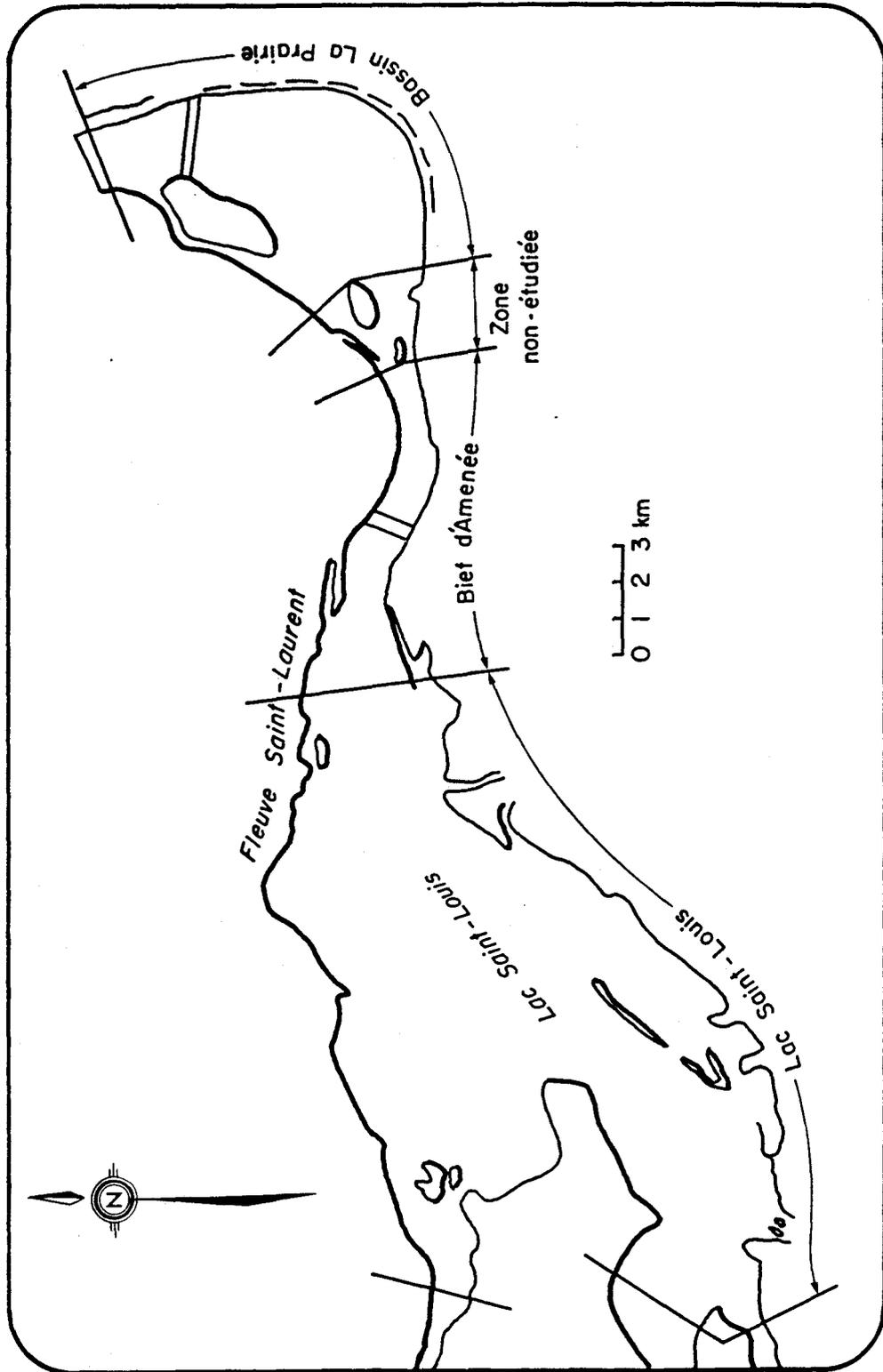
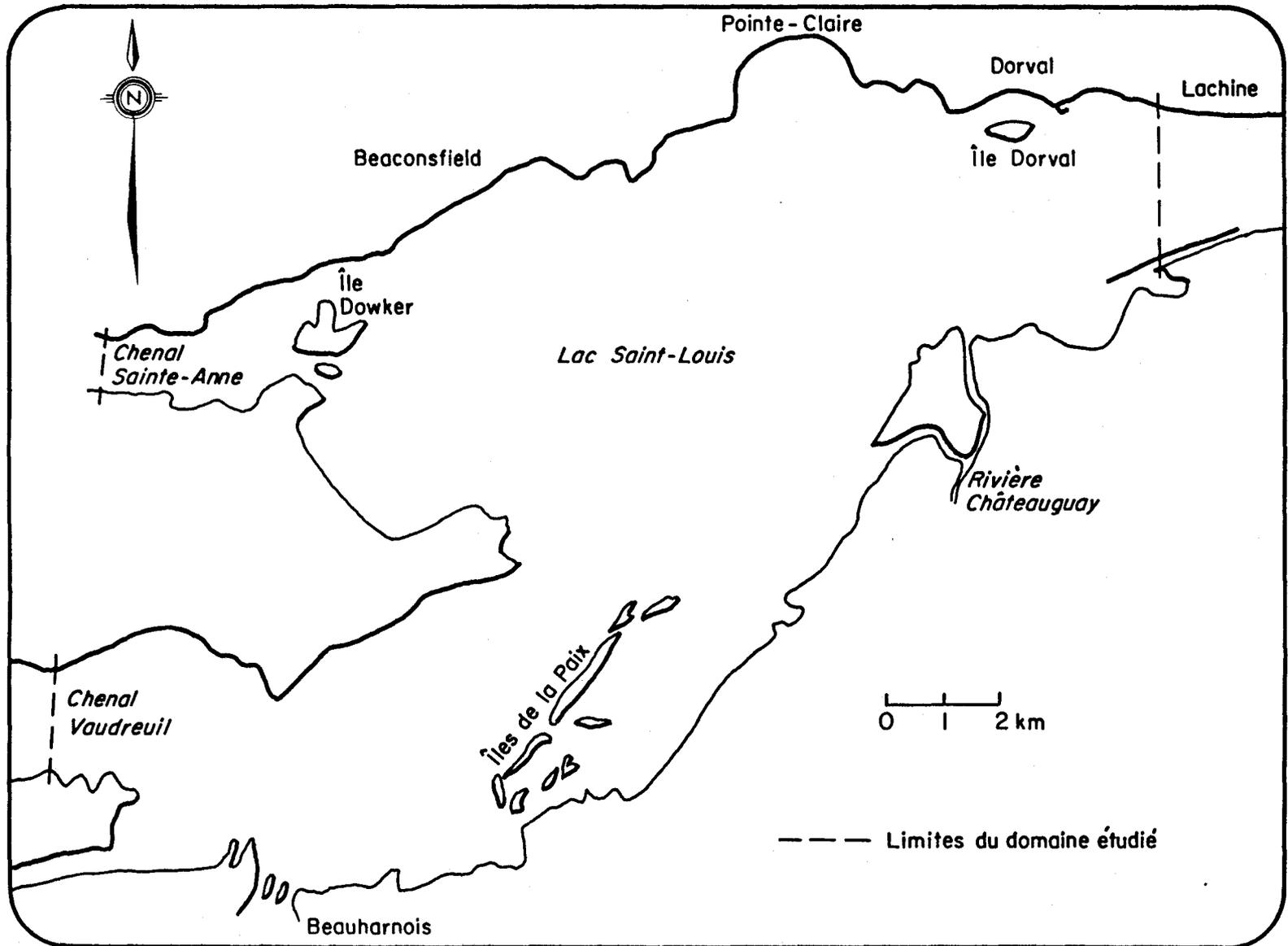


Figure 1: Ensemble de la région à l'étude

Figure 2: Zone à l'étude, Lac Saint-Louis



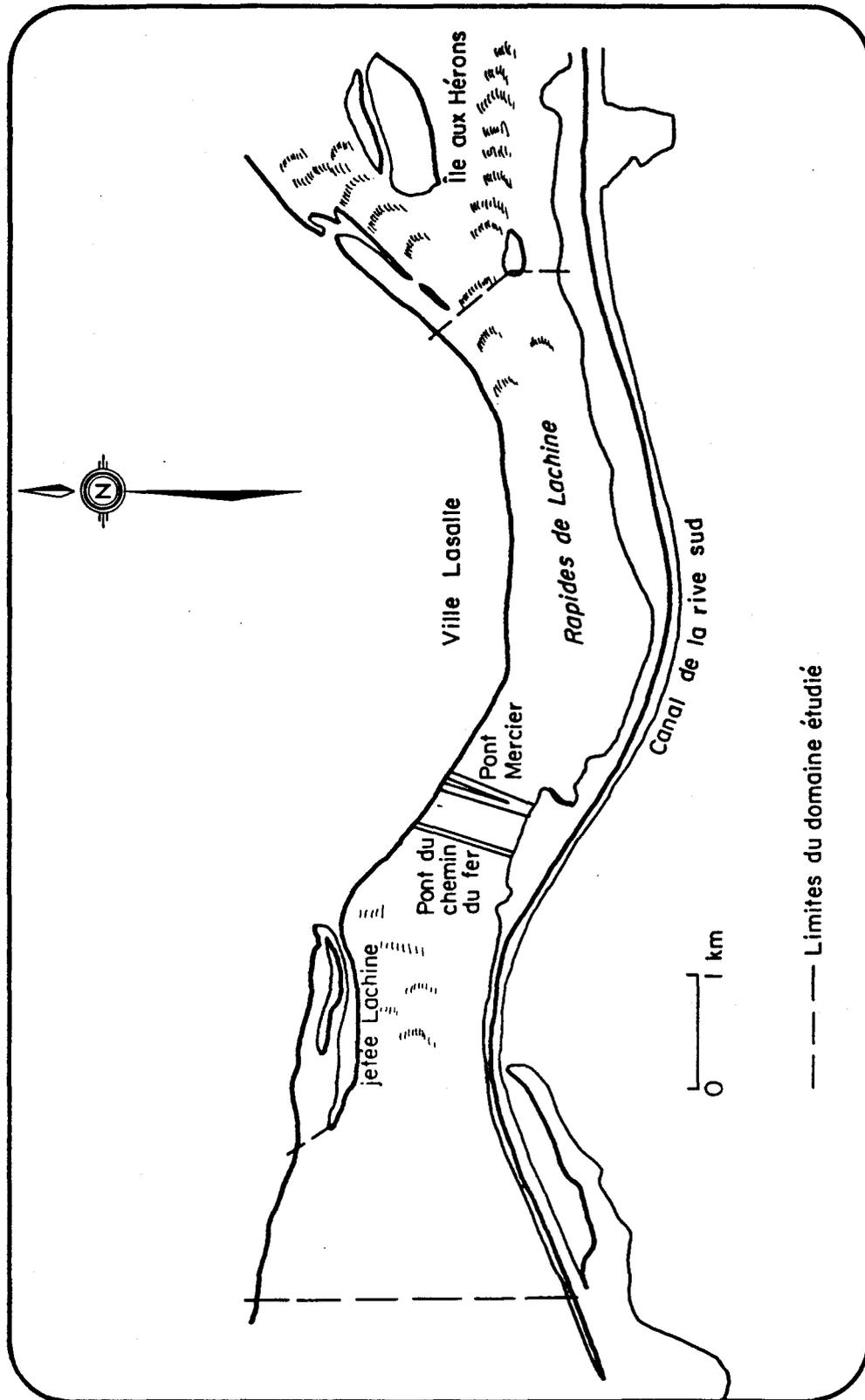


Figure 3: Zone à l'étude, bief d'amenée à la centrale

d'aménagement va entraîner un rehaussement significatif du plan d'eau ce qui résultera en une modification du régime de torrentiel à fluvial sur une part à déterminer du domaine. Le canal, pour sa part, est conçu pour favoriser le passage des crues en provenance du lac Saint-Louis. À cause de son efficacité hydraulique plus grande par rapport à l'ensemble de la section d'écoulement dans cette zone, il devrait attirer à lui une part importante du débit et modifier la valeur et l'orientation de la vitesse de l'eau. Des changements en rapport avec la ligne de partage des eaux de l'Outaouais et du Saint-Laurent sont aussi à envisager (mélange des eaux).

Enfin, à l'aval des rapides de Lachine, le bassin La Prairie (figure 4) est lui aussi susceptible de voir se transformer son régime hydrographique. Le mode d'exploitation de la future centrale à l'amont entraînera une modification significative du partage relatif des apports entre le bras nord des rapides de Lachine et le bras sud, ce qui devrait se traduire par des changements dans les vitesses d'écoulement, en particulier, dans la partie à l'amont du bassin. De plus, la disposition dans ce bassin des déblais de construction du canal de fuite de la centrale (sous forme de remblais en forme d'îles ou sur le littoral parallèle à la voie maritime) est aussi un facteur important à considérer.

Ces changements dans un contexte de responsabilité technique, environnementale et sociale du maître d'oeuvre, doivent être prévus et analysés de manière aussi précise que possible. L'utilisation des modèles numériques est actuellement, l'outil le plus efficace et le plus en mesure de fournir des réponses satisfaisantes.

1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La grande complexité d'analyse des effets de ces aménagements nous a amenés à partager l'étude en fonction de trois sous-domaines distincts mais interreliés:

- le lac Saint-Louis;

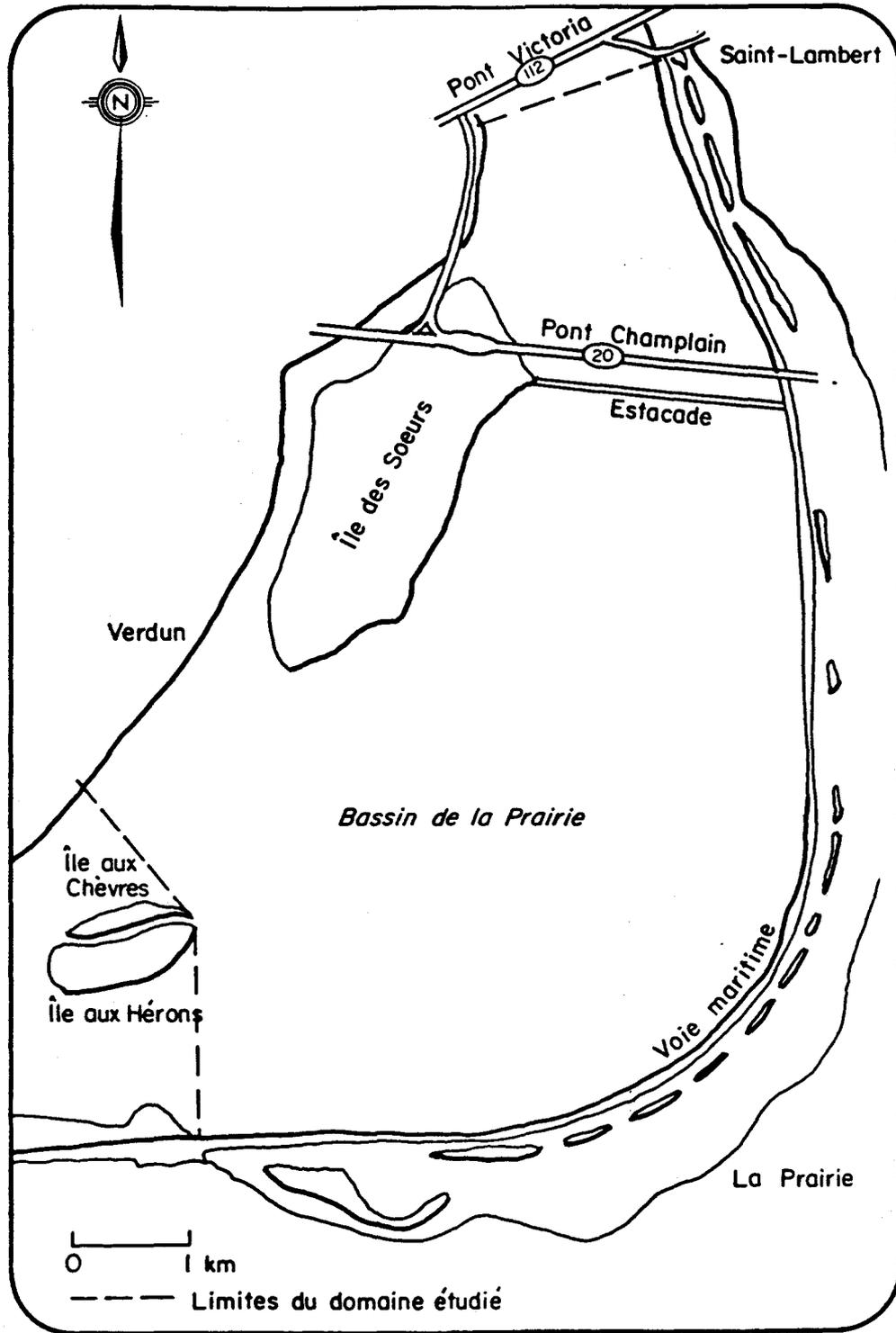


Figure 4: Zone à l'étude, bassin La Prairie

- le bief d'amenée;
- le bassin La Prairie.

De même, le régime hydrologique est statistiquement complexe et nous a conduits à concentrer notre analyse sur des situations définies par le client comme typiques à divers niveaux de la gamme possible des régimes. Ainsi, nous avons étudié les conditions d'écoulement pour:

- l'étiage décennal,
- le débit module,
- la crue décennale et parfois,
- la crue centennale.

Chacune de ces situations possibles peut parfois être obtenue avec un partage différent des apports à l'amont si plusieurs tributaires participent à l'alimentation. C'est le cas du lac Saint-Louis et du bassin La Prairie. Nous allons présenter les conditions hydrologiques de simulation au chapitre IV.

Ces remarques préliminaires permettent de définir chacune des situations particulières pour lesquels nos objectifs sont applicables. Les objectifs généraux de l'étude sont d'abord de définir l'état de référence biophysique actuel du milieu à l'étude et ensuite, d'en prévoir les modifications. Les conditions biophysiques sont:

- le niveau d'eau;
- la profondeur d'eau totale;
- la valeur et l'orientation des vitesses de l'eau en eau libre de glace;
- le régime de mélange des eaux de diverses provenances.

Ces modifications sont complexes dans la mesure où elles sont présentes à des degrés divers et réparties partout sur les domaines étudiés. C'est pourquoi, un objectif important de cette étude est de préparer l'information obtenue à l'aide des moyens info-graphiques les mieux adaptés à cette tâche.

Cet objectif est important pour rendre plus efficace la tâche de l'aménageur dont le rôle sera éventuellement d'apporter un jugement de valeur sur l'ensemble des composantes du projet. Cette étude n'a pas pour but d'apprécier la valeur des aménagements. Elle vise essentiellement à produire une image brute aussi fidèle que possible des changements qui vont survenir et ce, dans une forme de communication efficace, le travail d'interprétation relevant du concepteur.

2.0 MÉTHODOLOGIE

2.1 MODÈLE MATHÉMATIQUE

La méthodologie d'analyse est fondée sur la modélisation par la technique des éléments finis. Nous utilisons le modèle MEFLU développé d'abord par Cochet (1979), Cochet et al (1982) puis, par Soulaïmani (1984) tous sous la direction du professeur Gouri Dhatt de l'Université Laval. Ce modèle nous fournit essentiellement des résultats sur l'hydrodynamique (vitesses, niveaux d'eau). À celui-ci, s'ajoute un modèle de transport-diffusion développé spécifiquement pour cette étude.

2.1.1 Modèle hydrodynamique (MEFLU)

On trouvera dans Dhatt et al (1985) une présentation élaborée des bases mathématiques de ce modèle. Nous allons reprendre brièvement les éléments essentiels de cette présentation.

Le modèle mathématique utilisé est basé sur les équations de Navier-Stokes décrivant le principe de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de continuité pour le principe de conservation de la masse. Ce modèle s'appuie sur les valeurs moyennes des vitesses dans la verticale. On obtient ainsi un modèle bidimensionnel particulièrement bien adapté pour les écoulements gravitationnels dans les eaux peu profondes. Ce modèle comporte des hypothèses importantes:

- la pression est hydrostatique (ondes longues);
- les termes d'accélération verticale sont considérés comme négligeables;
- les variations de la vitesse sont faibles dans la direction verticale.

Les conventions mathématiques du modèle sont illustrées à la figure 5. Les relations de base du modèle sont les suivantes:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(continuité)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u\partial u}{\partial x} + \frac{v\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u\partial v}{\partial x} + \frac{v\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = F_y \quad (3)$$

①

②

③

avec

$$F_x = \frac{-g|V|u}{C^2H} + f_c v + \nu_T \Delta u \quad (4a)$$

$$F_y = \frac{-g|V|v}{C^2H} - f_c u + \nu_T \Delta v \quad (4b)$$

④

⑤

⑥

où

- 1 : accélération locale;
- 2 : accélération convective;
- 3 : pression hydrostatique;
- 4 : frottement par le fond (contrainte de Chézy);
- 5 : force de Coriolis;
- 6 : contraintes turbulentes de Reynolds;
- u, v : vitesses moyennes selon x et y (x orienté à l'est, y au nord);
- v : la résultante des vitesses;
- h : hauteur d'eau relative;
- F_x, F_y : forces massiques selon x et y;
- g : gravité;
- C : coefficient de Chézy;
- f_c : coefficient de Coriolis;
- ν_T : la viscosité turbulente horizontale;
- Δ : opérateur Laplacien = $[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}]$.

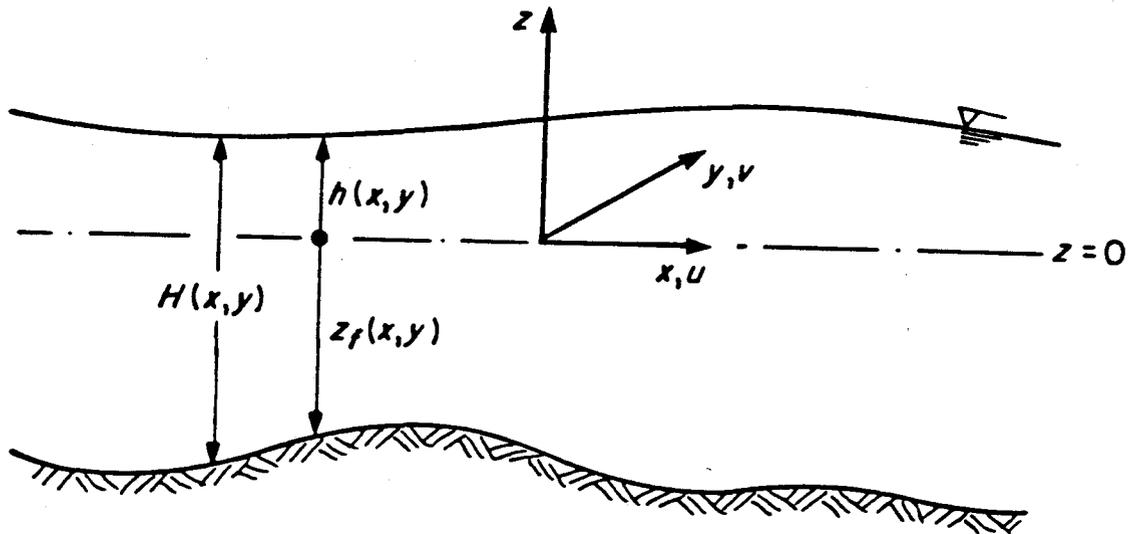


Figure 5: Conventions du modèle bi-dimensionnel

La viscosité turbulente peut être spécifiée constante ou décrite par une relation algébrique "à 0-équation" (voir Rodi, 1980) de type "longueur de mélange"

$$\nu_T = \lambda_m^2 \left[2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Le coefficient de Chézy est un paramètre permettant de tenir compte du phénomène de frottement. Souvent, on utilise une approche équivalente, celle dite "de Manning". Dans ce cas, la force de frottement et la suivante:

$$F_{xf} = \frac{-gn^2 |V| u}{H^{4/3}} \quad (6)$$

Les coefficients de Chézy et de Manning sont liés par la relation suivante:

$$C = \frac{H^{1/6}}{n} \quad (7)$$

où n est le n "de Manning".

Dhatt et al (1985) ont procédé à une revue critique de ces coefficients.

2.1.2 Modèle de transport-diffusion

Le mélange de deux eaux de qualités différentes dans un cours d'eau fait intervenir deux processus macroscopiques différents. Le premier implique le transport d'une certaine masse d'un produit en solution par déplacement du fluide lui-même. Nous assimilerons ce mécanisme à un phénomène de convection. En second lieu, la répartition spatiale de ce produit est conditionnée par l'intensité des écarts de vitesse du fluide en deux points voisins (turbulence). Cette contribution au mélange est souvent appelé la diffusion turbulente. Nous préférons utiliser le terme "dispersion".

La variation spatio-temporelle de la concentration d'un produit conservatif est décrite en considérant le principe de conservation de la masse de ce produit au sein du fluide. Dans un cas bidimensionnel, c'est-à-dire, là où la variation de la concentration sur la hauteur de l'écoulement est négligeable, cette relation s'écrit:

$$\begin{aligned} \text{variation temporelle:} & \quad \frac{\partial C}{\partial t} \\ \text{transport convectif} & \quad + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} \\ \text{dispersion} & \quad - \left(\frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ \text{Source-puits} & \quad = f \end{aligned} \quad (8)$$

où:

u, v : composante moyenne sur la verticale de la vitesse

C : concentration d'un produit conservatif

K_x, K_y : coefficients de dispersion

En y introduisant l'équation de continuité ($\text{div } \vec{u} = 0$), (8) s'écrira:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} = f \quad (9)$$

2.1.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle hydrodynamique sont:

- imperméabilité et glissement tangentiel au littoral (figure 6);

ie.: $U_N = 0$

$$\tau_{NT} = f(U_T)$$

où

U_N : vitesse normale

U_T : vitesse tangentielle

τ_{NT} : contrainte tangentielle en littoral.

- aux frontières ouvertes, on peut aussi imposer $q = HU_N \neq 0$, c'est-à-dire, des apports advectifs; ou encore, la hauteur d'eau relative h .

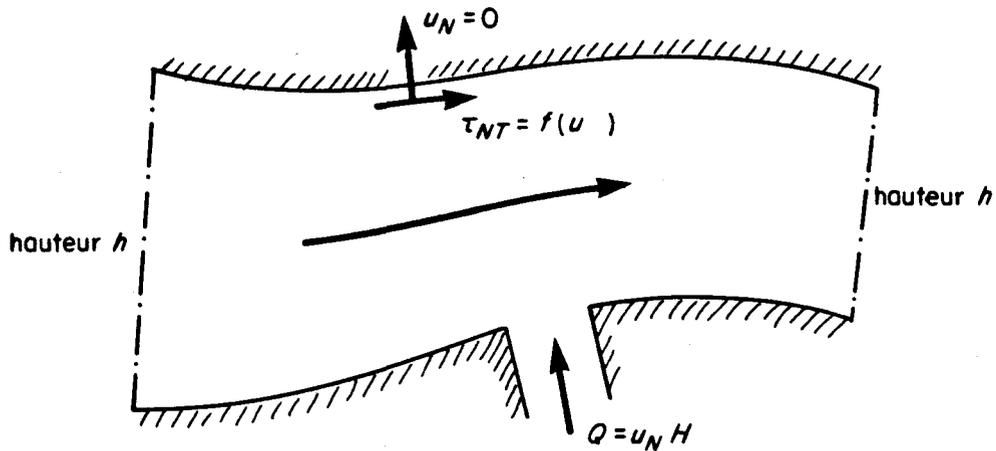


Figure 6: Conditions aux limites du modèle hydrodynamique

Le modèle de transport-diffusion s'utilise avec les conditions suivantes:

$$C(x,y,t) = C_i(t)$$

sur les frontières où la concentration est connue et imposée.

$$\phi_N = - K_N \frac{\partial C}{\partial N} \quad (10)$$

sur les frontières où sont imposées des conditions de flux normal ϕ_N .

Les conditions initiales s'écriront:

$$C(x,y,0) = C_0(x,y) \quad (11)$$

En pratique, on pourra distinguer deux écoulements (par exemple, le Saint-Laurent vs l'Outaouais) en supposant la présence homogène d'un traceur conservatif de concentration unitaire au sein d'un des deux milieux. (1,0 pour l'Outaouais, 0,0 pour le Saint-Laurent à l'amont du lac Saint-Louis). Si les deux écoulements se côtoient à l'entrée du domaine, on spécifie alors un profil transversal tel que le flux de masse totale du traceur (ϕ_N) corresponde à un total déterminé à l'amont du domaine.

2.2 MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRODYNAMIQUE

2.2.1 Forme variationnelle

Le modèle numérique est la version pratique informatisée du modèle mathématique. Les modèles numériques sont obtenus par discrétisation spatiale du domaine étudié. La méthode des différences finies, repose sur une discrétisation régulière de la géométrie du milieu. La technique des éléments finis est plus sophistiquée et permet de procéder à un maillage irrégulier ce qui lui confère une grande souplesse d'utilisation. C'est pourquoi, entre autres, nous privilégions cette méthode. Avec la méthode des éléments finis, le modèle mathématique est d'abord formulé sous forme d'un modèle variationnel à l'aide de la méthode des résidus pondérés de Galerkin (Dhatt et Touzot, 1981).

Nous avons un résidu $\{R(u)\}^1$ qui exprime le système d'EDP²

$$\{R(u)\} = \{\dot{u}\} + [L(u)] \{u\} + \{f\} = 0$$

où

$[L(u)]$: représente l'ensemble des opérateurs différentiels du modèle mathématique

$$\{\dot{u}\} = \left\langle \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial h}{\partial t} \right\rangle^T$$

¹ $\{ \}$ signifie un vecteur-colonne
 $\langle \rangle$ signifie un vecteur-ligne
 $\langle u \rangle$ signifie les inconnues $\langle u, v \text{ et } h \rangle$ du problème.

² Équations aux dérivées partielles.

Nous procédons à la formulation intégrale du résidu qu'on pondère par la première variation des inconnues du problème: δu (méthode de Galerkin)

$$W = \int_A \langle \delta u \rangle \{ R(u) \} dA = 0 \quad \forall \delta u$$

Quel que soit δu , la fonctionnelle W doit s'annuler si u est la solution du problème.

Le modèle variationnel a été élaboré de manière à accepter une bathymétrie discontinue (problème de surcreusement de lits de rivières, voir l'annexe 1 pour la développement).

2.2.2 Forme discrétisée

En pratique, le modèle variationnel apparaît sous une forme discrétisée en utilisant l'approximation par éléments finis des variables u et de leur première variation δu . Notre approche consiste à utiliser comme élément de base un triangle à 6 noeuds tel que montré à la figure 7.

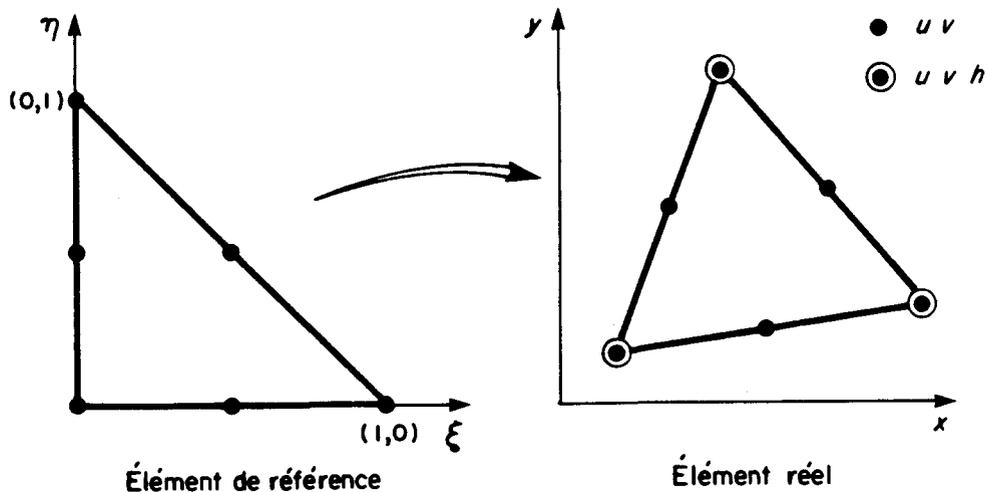


Figure 7: Discrétisation par éléments finis et approximation des variables

Les variables $u(x,y)$, $v(x,y)$ et $h(x,y)$ et leur première variation sont représentées dans le modèle variationnel par une approximation nodale ou fonction d'interpolation dans laquelle les variables inconnues sont les paramètres. Ainsi:

$$u(x,y) = \langle N(x,y) \rangle \{u_n\}$$

$$v(x,y) = \langle N(x,y) \rangle \{v_n\}$$

$$h(x,y) = \langle N_h(x,y) \rangle \{h_n\}$$

et

$$\delta u(x,y) = \langle N(x,y) \rangle \{\delta u_n\}$$

$$\delta v(x,y) = \langle N(x,y) \rangle \{\delta v_n\}$$

$$\delta h(x,y) = \langle N_h(x,y) \rangle \{\delta h_n\}$$

où

$\langle N(x,y) \rangle$ sont les fonctions d'interpolation des vitesses

$\langle N_h(x,y) \rangle$ fonctions de la hauteur d'eau

Notre approche consiste à utiliser une approximation quadratique ($n = 6$) pour les vitesses et linéaire ($n = 3$) pour la hauteur d'eau, cette condition étant nécessaire pour faciliter la convergence du modèle. La géométrie du domaine est habituellement prise en compte sur un élément de référence à géométrie unitaire. La transformation du modèle de l'élément de référence à l'élément réel s'effectue à l'aide d'une transformation géométrique isoparamétrique à la hauteur d'eau

$$\langle x,y \rangle = \langle \bar{N}(\xi,\eta) \rangle [\{x_n\} \{y_n\}]$$

$n = 3$

avec

$$\langle \bar{N}(\xi,\eta) \rangle = \langle N_h(\xi,\eta) \rangle$$

La bathymétrie (h') est donnée constante par élément. Cette approximation, justifiée par la formulation variationnelle de notre modèle (annexe 1) permet de tenir compte facilement d'aménagements de type canaux creusés dans le lit. Après que les variables u et δu auront été remplacées par leur approximation nodale sur chaque élément du domaine, nous obtenons des systèmes algébriques matriciels élémentaires qu'il faudra par la suite assembler dans un système global:

$$[M]\{\dot{U}\} = [K(U)]\{U\} + \{F\} = 0$$

Notre approche des problèmes d'écoulement consiste à considérer ces phénomènes comme une suite d'événements quasi-stationnaires ce qui nous permet d'écrire

$$[K(U)]\{U\} + \{F\} = 0$$

où

- $\{U\}$: vecteur global des inconnues du problème
- $\{R\}$: vecteur résidu
- $[K(U)]$: matrice globale.

2.2.3 Méthode de résolution

La solution de ce problème non-linéaire s'obtient dans notre modèle par une méthode de type Newton. Cette méthode nécessite la construction de la matrice tangente à $[K]$, c'est-à-dire, la matrice $[K_t]$. La démarche de cette méthode est expliquée en détail dans Dhatt et Touzot (1981). Elle permet de formuler le problème ainsi:

soit
$$\{R(U)\} = [K(U)]\{U\} + \{F\} = 0$$

$$[K_t(U^{i-1})]\{\Delta U^i\} = \{R(U^{i-1})\} = \{R^i\}$$

et $\{U^i\} = \{U^{i-1}\} + \{\Delta U^i\}$

où

U^i : valeur de U à l'itération i;

ΔU^i : mise à jour de la solution.

L'approche de la modélisation par éléments finis est illustrée globalement à la figure 8.

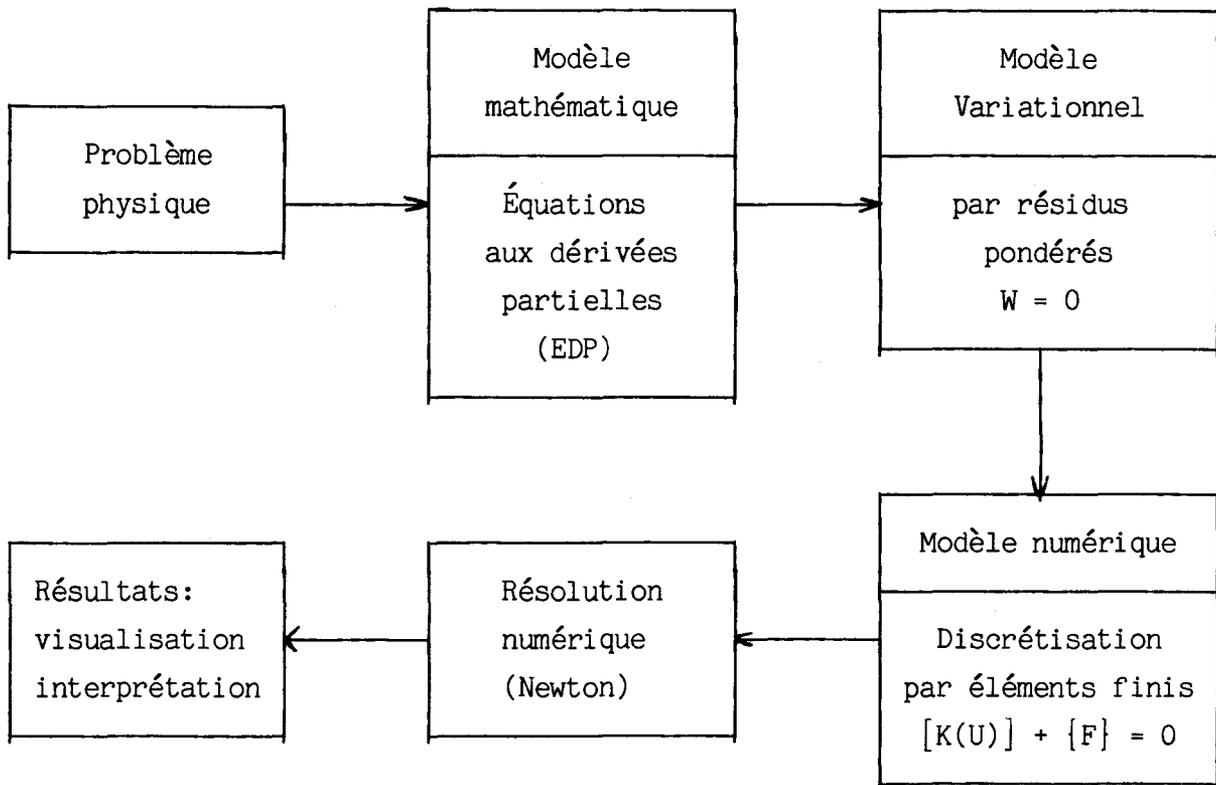


Figure 8: Résumé de la méthode numérique

2.2.4 MEFLU en bref

Nous avons regroupé ici les caractéristiques de base du modèle MEFLU:

- le modèle de base est celui des "eaux peu profondes" (shallow water equations);
- les variables sont les vitesses moyennes dans la verticale et la hauteur d'eau;
- la pression est considérée comme hydrostatique (onde longue);
- tous les effets de la turbulence verticale sont négligés;
- les éléments finis sont des triangles à 6 noeuds (T-6);
- les vitesses sont représentées par une approximation quadratique et la hauteur par une forme linéaire (continuité de type C_0);
- la méthode de Newton-Raphson est utilisée pour résoudre le système non-linéaire;
- les résultats sont présentés graphiquement en multiples couleurs d'iso-vitesses, trajectoires d'écoulement, iso-niveaux d'eau, etc.;
- ce modèle est bien adapté pour étudier les régimes permanents et non-permanents dans les rivières, les fleuves et les estuaires;
- le modèle est valable pour tous les problèmes d'écoulements fluvial, torrentiel et turbulent respectant l'hypothèse des ondes longues.

2.3 MODÈLE NUMÉRIQUE DE TRANSPORT-DIFFUSION

2.3.1 Le problème

La discrétisation du phénomène de dispersion pure ne pose pas de problème particulier. En effet, l'élimination des termes convectifs conduit à une formulation de type équation de Poisson dont la résolution discrète par diverses méthodes numériques est bien cernée.

À l'opposé, la résolution numérique d'un phénomène de transport prédominant se heurte à un comportement communément appelé diffusion numérique. Il est possible de démontrer à l'aide de la discrétisation par différences finies qu'à mesure que l'influence relative de la diffusion s'amenuise, c'est-à-dire, que le nombre de Péclet augmente, une diffusion numérique apparaît à cause de l'impossibilité de représenter un fort gradient avec un certain pas de discrétisation. Il en résulte que les noeuds voisins se voient affectés de valeurs erronées.

Pour remédier à cette situation, le schéma de discrétisation spatial doit en quelque sorte être ajusté en fonction de la position et de l'intensité des forts gradients. Ceci peut se faire par relocalisation des points de discrétisation ou bien par décalage du schéma numérique. À l'instar de Löhner et al (1983), nous avons opté pour la deuxième solution en choisissant une pondération de Taylor-Galerkine dans la formulation intégrale discrète (voir l'annexe 2).

2.3.2 Discrétisation de la forme intégrale

L'utilisation de fonctions d'interpolation linéaire sur un élément triangulaire à trois noeuds conduit à la forme discrète du modèle. Notre approche s'appuie sur le même maillage que le modèle hydrodynamique de manière à minimiser nos opérations de pré-traitement. L'élément T-6 devient alors un super-élément à 4 composantes T-3 (figure 9).

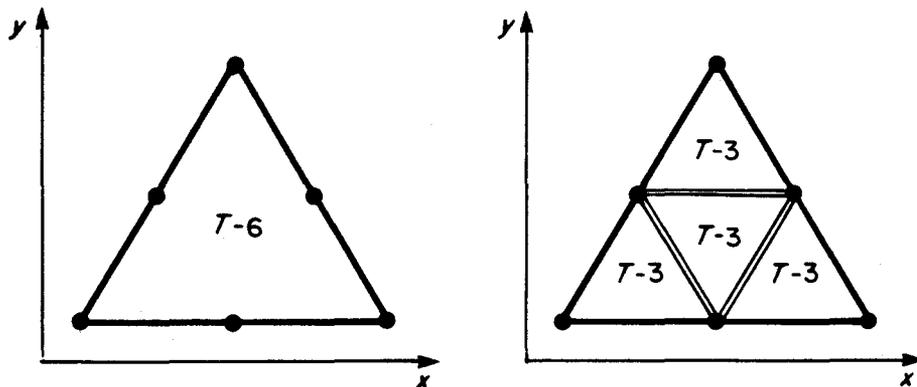


Figure 9: Transformation du maillage hydrodynamique pour le transport-diffusion

2.3.3 Résolution

Nous avons développé un modèle non-permanent (annexe II); cependant, dans le cadre de notre étude, des conditions d'écoulement permanent étaient présentes. Comme les termes diffusifs provenant du développement en série de Taylor dépendent du pas de temps choisi nous avons donc établi la stratégie suivante:

- a) calcul en régime permanent d'une solution diffusive par l'emploi d'un coefficient de diffusion suffisamment élevé pour obtenir une solution stable;
- b) propagation des conditions aux limites amont par convection en utilisant le schéma temporel de façon à accentuer les gradients (à réduire le mélange);

- c) ajustement du modèle par comparaison avec des mesures en nature en ajoutant des coefficients de diffusion dans le cycle temporel.

2.4 CHEMINEMENT DE LA MÉTHODE

On trouvera à la figure 10 une illustration du cheminement global de la méthode utilisée pour la présente étude.

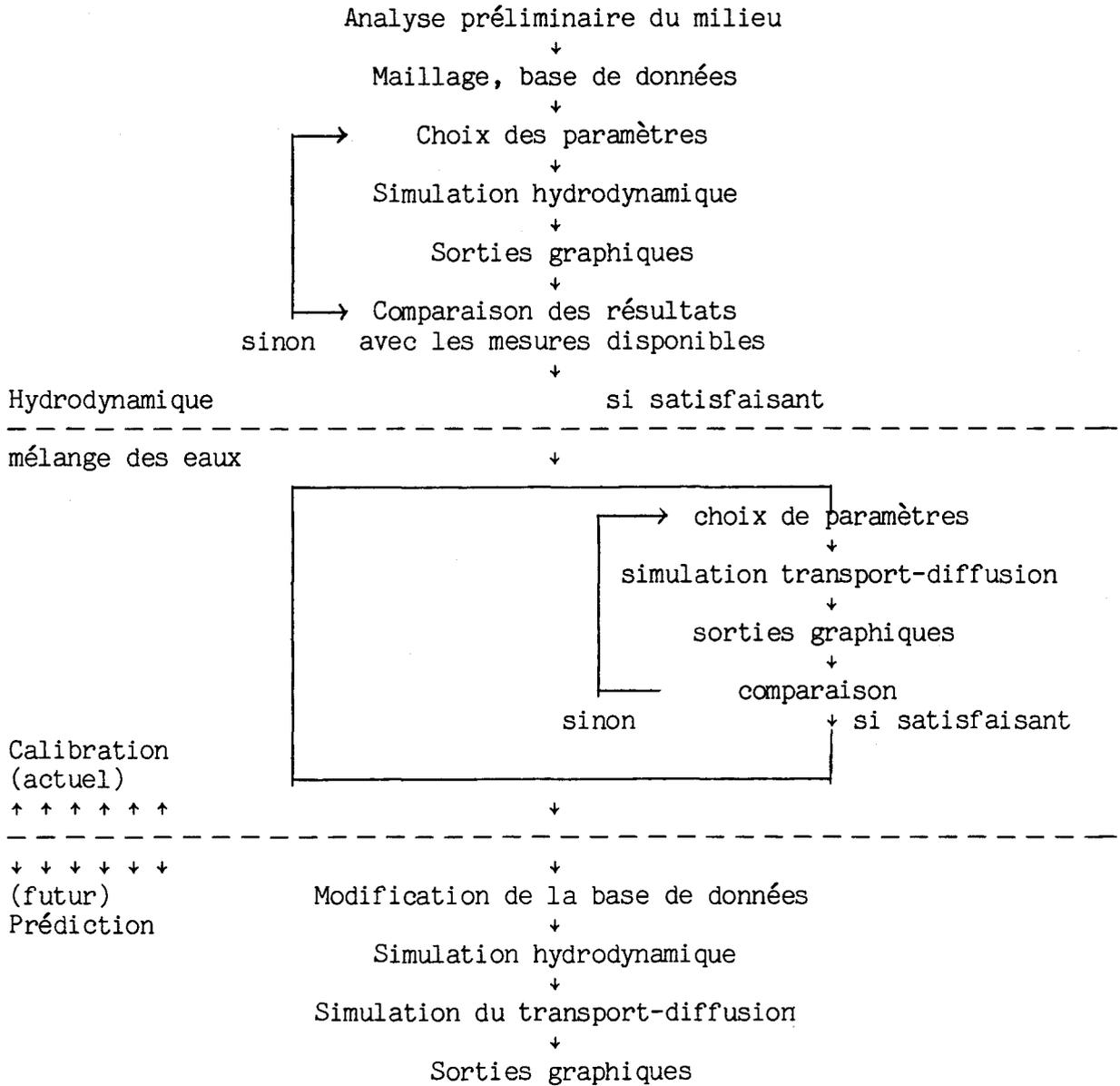


Figure 10: Cheminement global de la méthode

3.0 DONNÉES DE BASE ET CHOIX DES PARAMÈTRES

3.1 CONDITIONS D'HYDRAULICITÉ

Les conditions d'hydraulicité peuvent être très variées selon la part relative des apports par les tributaires ou l'effet transitoire occasionné par la variation temporelle des débits. Notre approche consiste à considérer les événements étudiés comme stationnaires pour un intervalle de temps donné. Les conditions de débit "typiques" doivent être choisies de manière à refléter une gamme de possibilités réaliste et sécuritaire. La notion de sécurité est particulièrement applicable aux conditions de crues.

Les conditions spécifiques d'hydraulicité sont définies statistiquement. Pour les fins de cette étude, nous avons utilisé les valeurs qui nous ont été fournies par le client, Hydro-Québec.

Pour le lac Saint-Louis et le bief d'amenée, quatre niveaux d'hydraulicité ont fait l'objet de nos simulations: l'étiage décennal, le module et les crues décennale et centennale. Le bassin La Prairie a été simulé pour ces trois premiers états seulement. On trouvera aux tableaux 1, 2 et 3 toutes les conditions de débit simulé tant en fonction de la situation actuelle que future.

Certaines remarques doivent être faites en rapport avec les conditions d'hydraulicité définies par une période de récurrence donnée dans le lac Saint-Louis (étiage et crues). On remarque dans le tableau 1 que des partages différents de débit entre les différents tributaires ont été considérés. Cette procédure est nécessaire pour tenir compte du degré de concomitance (simultanéité) d'événements indépendants de même récurrence. Ainsi, il est peu probable que l'étiage décennal du Saint-Laurent à Beauharnois (comprenant les apports par l'évacuateur des Cèdres) soit concomitant à celui de l'Outaouais (chenal Sainte-Anne ajouté au chenal Vaudreuil). De même, à l'exutoire du lac Saint-Louis, l'étiage défini comme décennal tient par définition compte de la concomitance des événements à l'amont puisqu'on

Tableau 1a: Conditions d'hydraulicité actuelles typiques du lac Saint-Louis
(en m³/s)

Portion de domaine	Étiage décennal de base	Étiage scénario A	Étiage scénario B	Module
Entrées				
Beauharnois	5 617	(6 000)		6 430
Les Cèdres	283	(302)		940
Sainte-Anne	82		(424)	556
Vaudreuil	14		(74)	348
Chateauguay	2			43
Total	5 998 ¹	6 400	6 400	8 317 ²
Sorties				
Rapides	6 300			8 200
Voie maritime	100			200
Total	6 400 ¹			8 400 ²

Suite

Portion de domaine	Crue décennale de base	1/10 A	1/10 B	Crue centennale de base	1/100 A	1/100 B
Entrées						
Beauharnois	7 323			7 323	(2 320)	
Les Cèdres	2 966	(1 566)		4 743		
Sainte-Anne	(55%) 1 848		(1 058)	2 257		(1 046)
Vaudreuil	(45%) 1 489		(859)	2 256		(1 044)
Chateauguay	558			857		
Total	14 164 ¹	12 764	12 764	17 436	15 013	15 013
Sorties						
Rapides	12 431			14 560		
Voie maritime	333			453		
Total	12 764 ¹			15 013		

¹ Le total des entrées n'égale pas le total des sorties à cause de la démarche statistique utilisée qui présuppose que les événements aux entrées sont concomitants ce qui ne devrait pas être le cas. Le résultat obtenu avec l'hypothèse de concomitance donnerait une récurrence plus sévère. On concilie les entrées et sorties en adoptant deux scénarios de répartition des apports. Chacun des scénarios privilégie la récurrence d'une des sources d'apport (A = Sainte-Anne-Vaudreuil; B = Saint-Laurent, les Cèdres).

² Différence due aux apports directs au lac.

Tableau 1b: Conditions d'hydraulicité futures typiques du lac Saint-Louis
(en m³/s)

Les conditions futures d'étiage et de module sont les mêmes qu'actuellement.

Conditions de crues

Portion de domaine	Décennale de base	1/10 A	1/10 B	centennale de base	1/100 A	1/100 B
Entrées						
Beauharnois	7 323			7 323		
Les Cèdres	2 966	(1 566)		4 743	(2 318)	
Sainte-Anne	2 729		(2 030)	3 542 ¹		(1 943)
Vaudreuil	1 300		(600)	1 827		(1 003)
Chateauguay	558					
Total	14 876	13 477	13 477	18 294	15 869	15 869
Sorties						
Rapides	13 144			14 369		
Voie maritime	333			1 500		
Total				15 869		

¹ Proportion relative 66%-34% maintenue pour le scénario B.

Tableau 2: Conditions d'hydraulicité typiques actuelles et futures du bief d'amenée

a) Conditions actuelles

Portion de domaine	Étiage décennal	Module	Crue décennale	Crue centennale
Entrée	6 300	8 200	12 431	14 560
Sorties				
Sud île du Diable	N/D	N/D	N/D	N/D
Nord île du Diable	N/D	N/D	N/D	N/D
Total	6 300	8 200	12 431	14 560

b) Conditions futures¹ (Plan de gestion)

Portion de domaine	Débit			
	Étiage	Module	Crue décennale	Crue centennale
Entrée	6 300	8 200	13 144	14 369
Sorties				
Régulateur	1 575	2 050	3 286	3 592
Centrale	4 725	6 150		
Évacuateur de crue	--	--	9 858	10 777
Total	6 300	8 200	13 144	14 369

¹ Répartition: 25% vers le régulateur
75% vers la centrale et l'évacuateur

Tableau 3: Conditions d'hydraulicité typiques actuelles et futures du bassin La Prairie

a) Conditions actuelles

Portion du domaine	Débit		
	Étiage	Module	Crue 1/10 ans
Entrée			
Bras nord rapides	2 460 (39%)	3 200 (39%)	4 475 (36%)
Bras sud rapides	3 840 (61%)	5 000 (61%)	7 840 (64%)
Sortie	6 300	8 200	12 431
Voie maritime (hors domaine)	(100)	(200)	(333)
Total	(6 400)	(8 400)	(12 764)

b) Conditions futures

Portion du domaine	Débit (m ³ /s)		
	Étiage	Module	Crue
Bras nord	1 250 (20%)	1 550 (19%)	2 175 (16%)
Bras sud gauche	300	450	900
Bras sud droit	4 750 } (80%)	6 200 } (81%)	9 300 } (84%)
Voie maritime ①	--	--	1 100
Voie maritime* ②	(100)	(200)	(400)
Total pour simulation	6 300	8 200	13 475
Total (Saint-Laurent)	(6 400)	(8 400)	(13 875)

* Hors domaine

étudie des séries hydrologiques observées. C'est pourquoi, l'étiage décennal à la sortie du lac Saint-Louis sera moins sévère que celui qui serait obtenu par la somme des événements de même récurrence à l'amont.

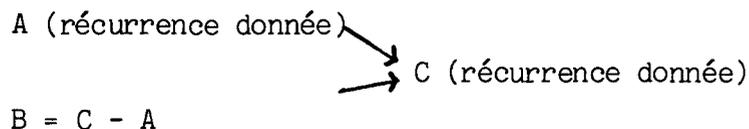
Il en va de même pour les crues qui sont aussi des événements définis par une période de récurrence. Seul le module échappe à cette difficulté. On peut en effet considérer que la moyenne d'une somme d'événements équivaut à la somme des moyennes de ces événements.

Pour contourner ces difficultés, nous avons adopté comme conditions d'hydraulicité typiques celles de l'exutoire. Pour déterminer les débits d'entrée aux tributaires, nous avons en accord avec Hydro-Québec, envisagé différents partages. Deux scénarios sont considérés:

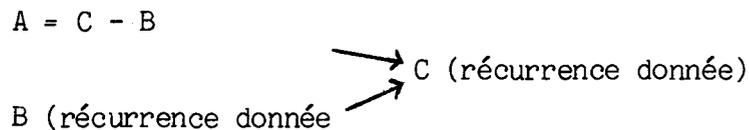
- Soit A : les apports du Saint-Laurent
B : les apports de l'Outaouais
C : le débit à l'exutoire du lac Saint-Louis

Nous avons alors les possibilités suivantes:

1^{re} possibilité:



2^e possibilité:



Enfin, si l'on considère les conditions du bassin La Prairie, on remarque également des effets de partage des apports entre les deux bras des

rapides de Lachine de chaque côté de l'île aux Hérons. En conditions actuelles très peu d'information est disponible à cet égard. Quelques mesures sont disponibles (voir le rapport) donnant un partage de 39% pour le bras nord et 61% pour le bras sud pour un débit de 8 300 m³/s. Pour les autres débits, nous avons dû extrapoler cette valeur, en considérant, comme nous le verrons plus loin dans la détermination des conditions aux limites pour la calibration, que le niveau de bassin La Prairie est relativement constant dans une section en travers de l'amont du bassin.

Quant aux conditions en contexte aménagé, on comprendra que celles-ci sont entièrement déterminées par le plan d'exploitation des ouvrages de production, d'évacuation et de régularisation à l'amont. De même, les débits en provenance de la voie maritime en situation de crue sont déterminés d'après des règles bien définies. Il est également à noter que les apports par le bras sud des rapides de Lachine se partagent de chaque côté (gauche et droit) d'un remblai d'îles qui divise le domaine des rapides dans cette région.

3.2 MAILLAGE

La durée des calculs sur les équipements informatiques disponibles et la précision recherchée sont les deux facteurs qui déterminent la densité du maillage que l'on va adopter pour les simulations.

Compte tenu de nos disponibilités informatiques (VAX-785 du Centre de recherche sur les applications numériques en ingénierie, CRANI), il a été jugé optimal d'adopter des mailages à 400-500 éléments triangulaires, ce qui équivaut à construire des systèmes à 2 000 variables environ. On trouvera aux figures 11, 12, 13, 14 et 15 (également aux annexes LSL.A¹, LSL.F,

¹ Ce code a été retenu pour faciliter la consultation des annexes. Sa signification est la suivante:

LSL: lac Saint-Louis ; BAM = bief d'aménée ; LPR: La Prairie
.A: actuel ; .F: futur.

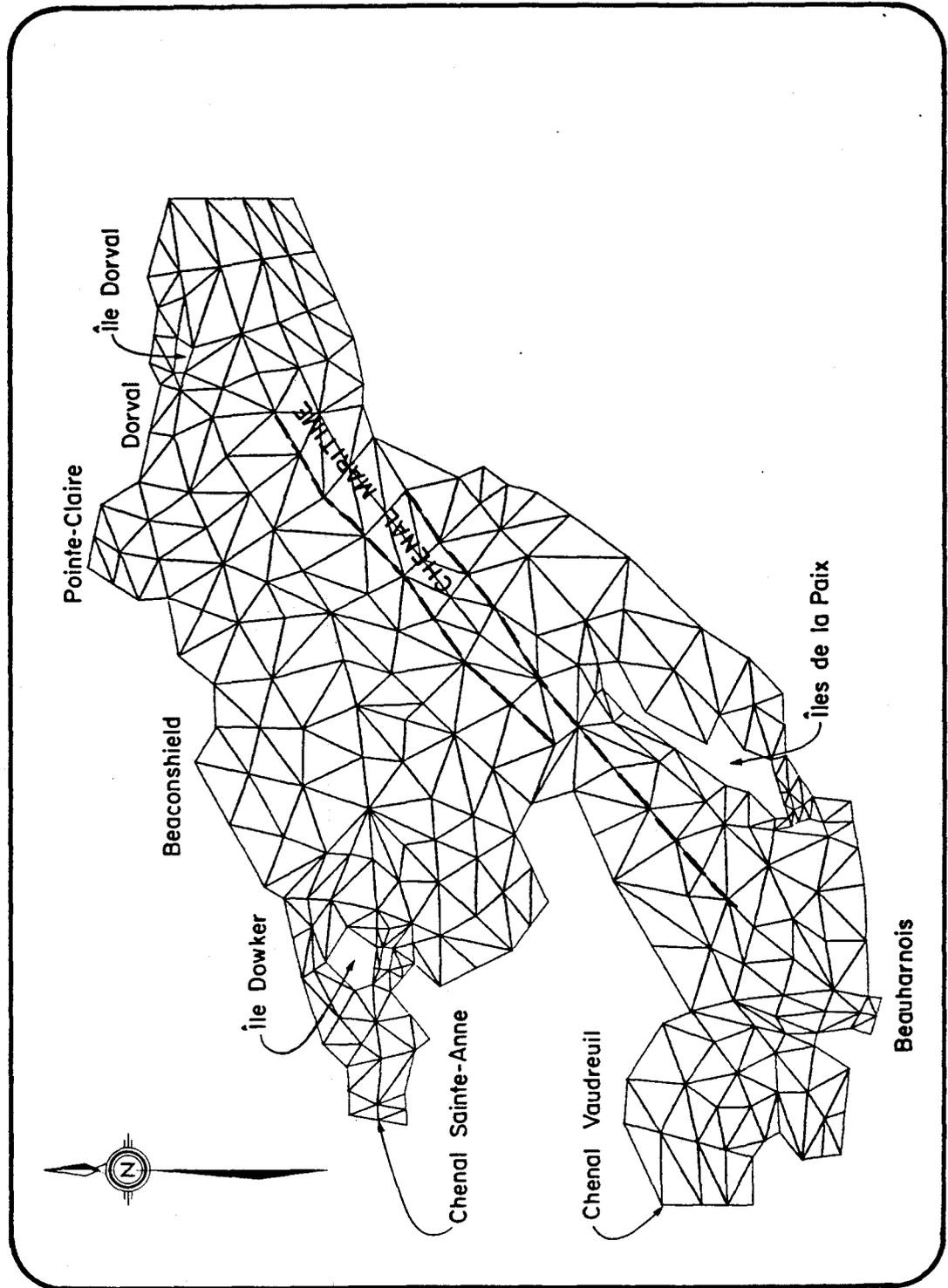


Figure 11: Maillage du lac Saint-Louis

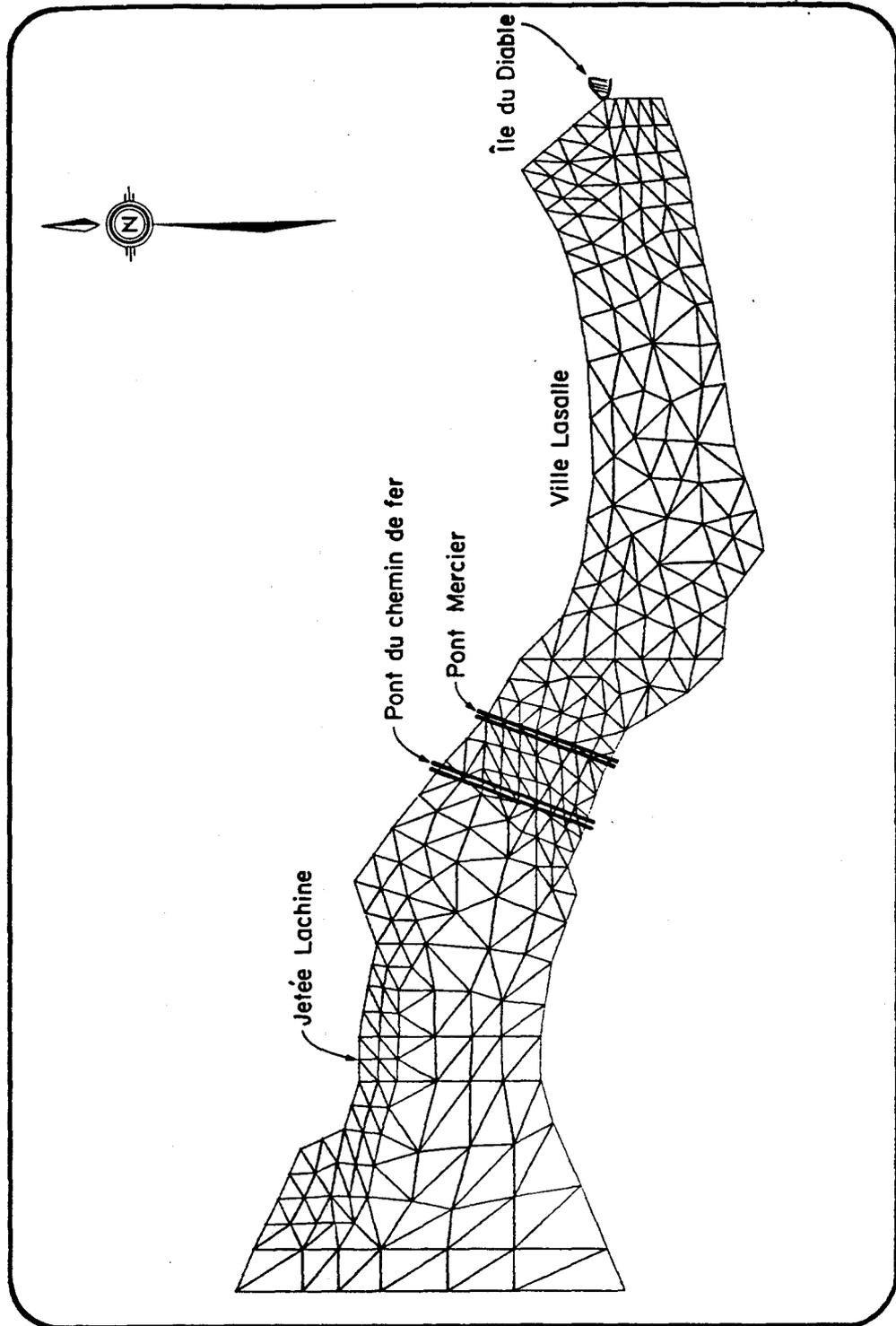


Figure 12: Maillage du bief d'amenée - conditions actuelles

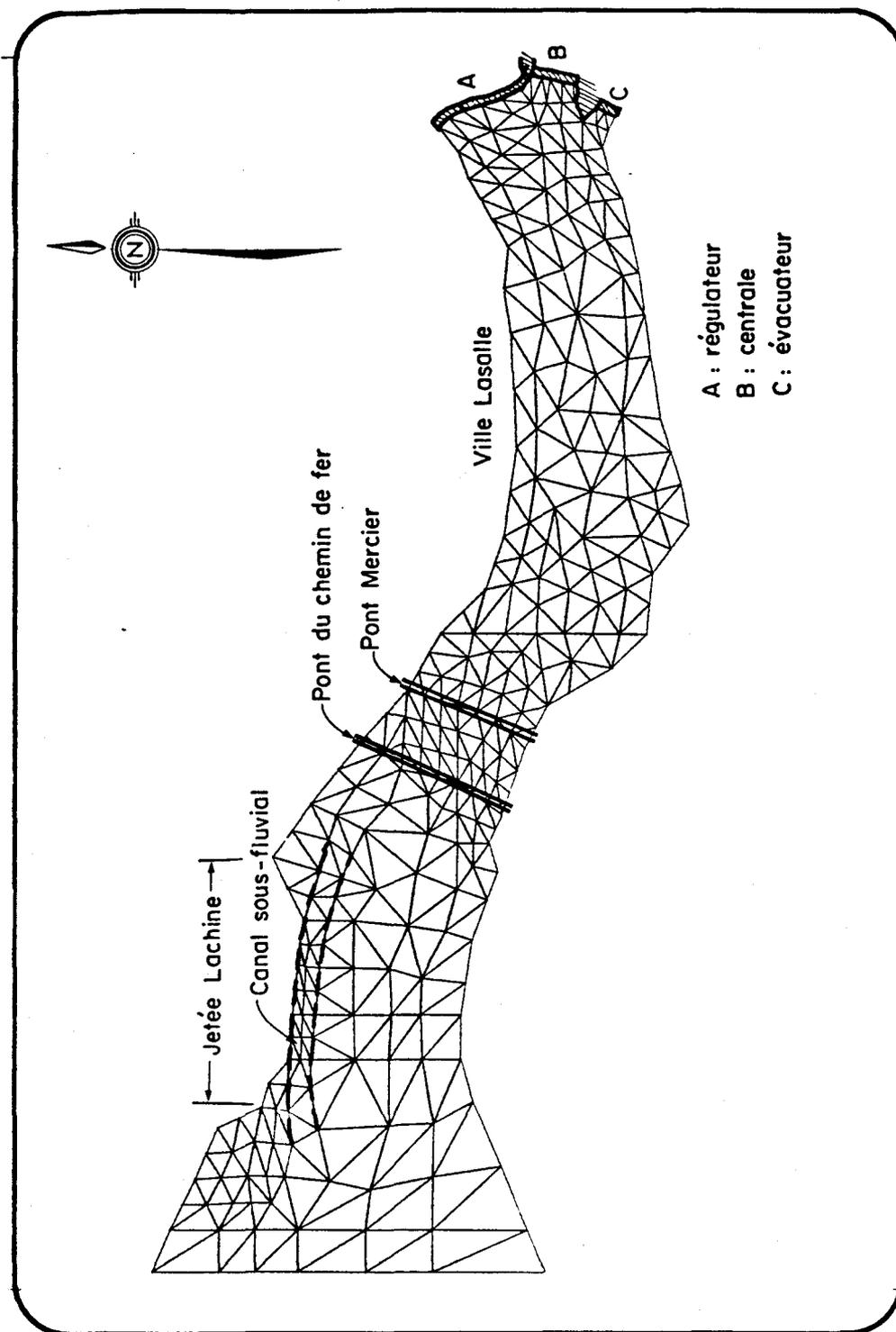


Figure 13: Maillage du bief d'amenée - conditions futures

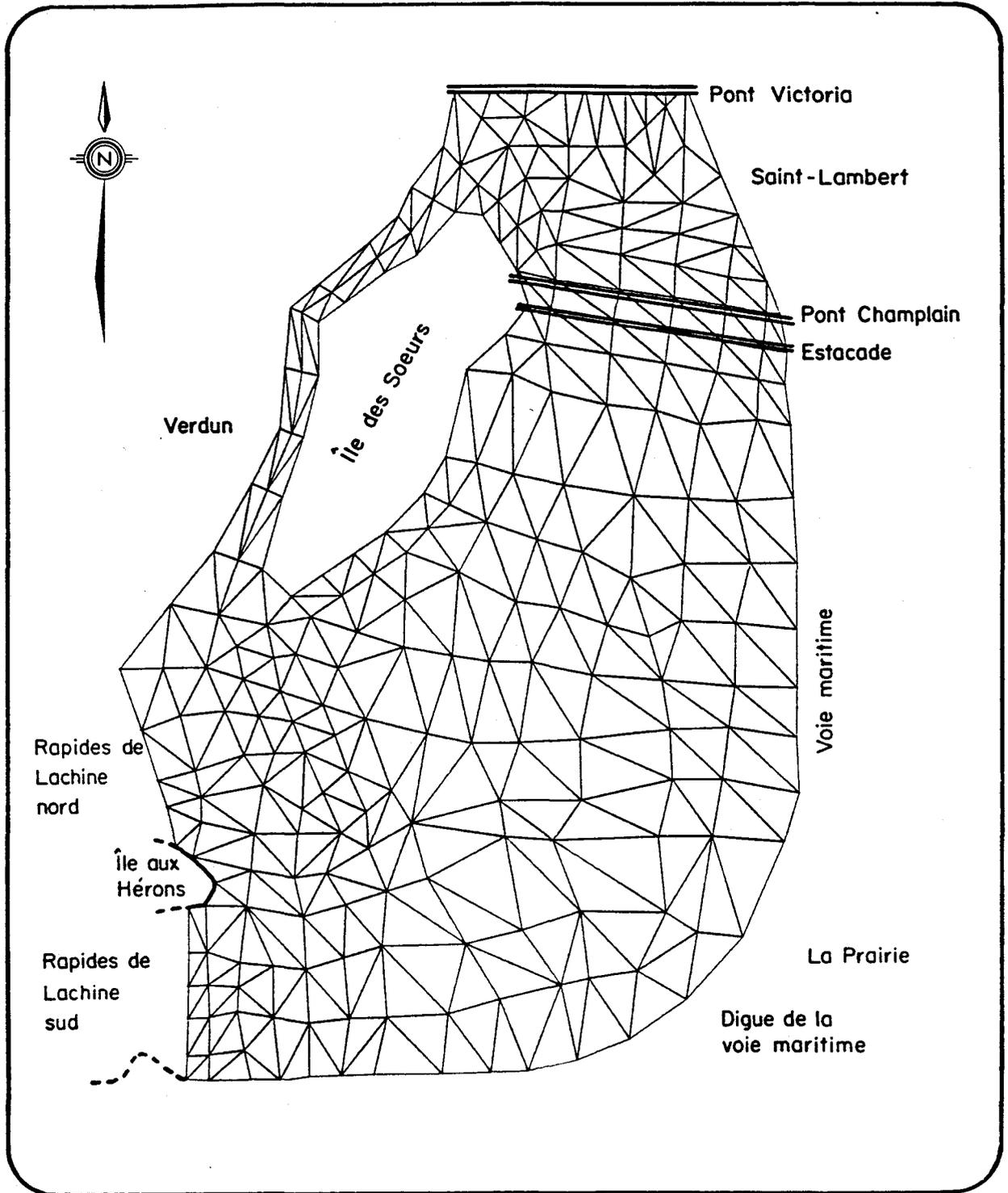


Figure 14: Maillage du bassin La Prairie - conditions actuelles

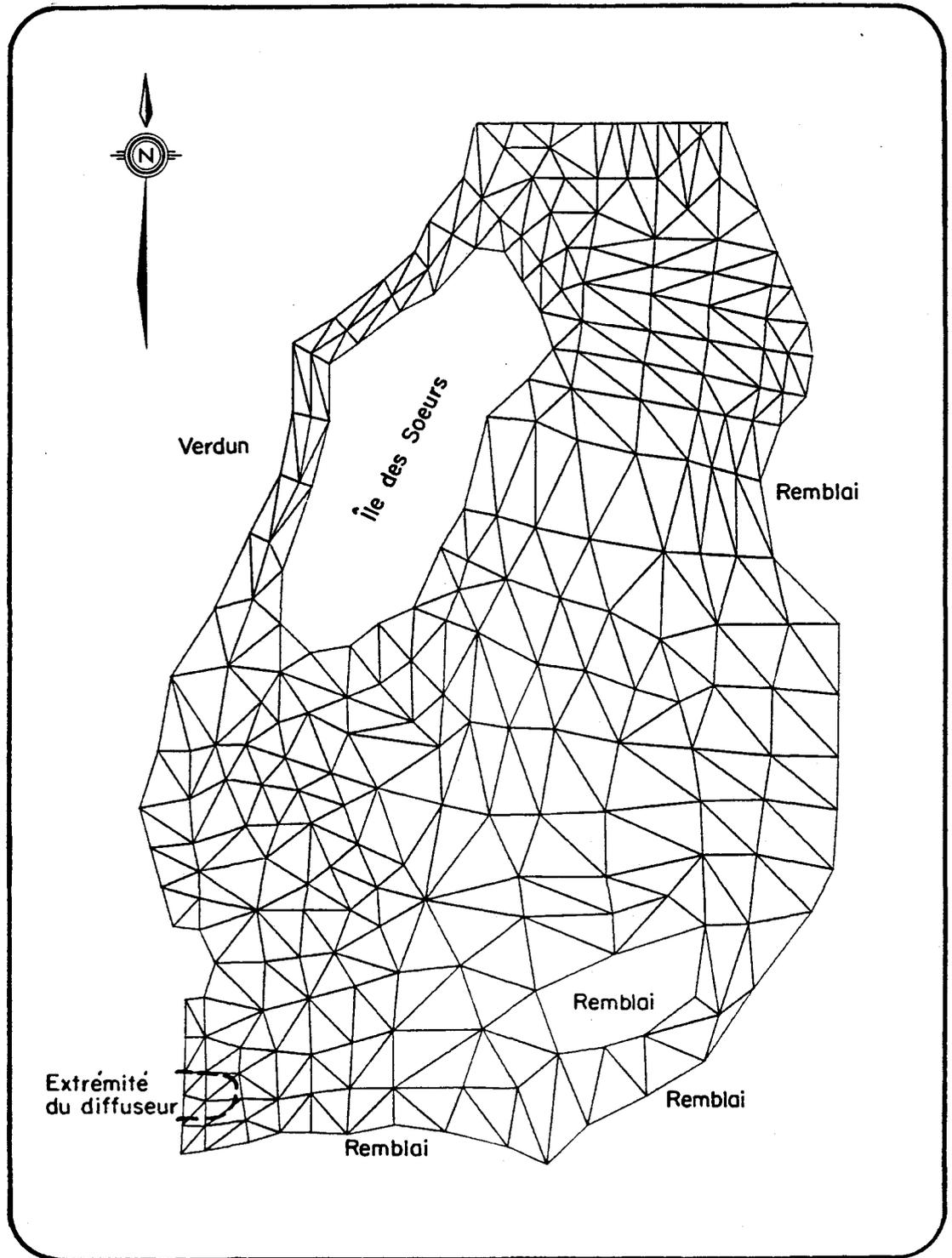


Figure 15: Maillage du bassin La Prairie - conditions futures (scénario 1)

BAM.A, BAM.F, LPR.A, LPR.F) les illustrations des maillages utilisés pour nos simulations.

En général, on situe une frontière ouverte du domaine de telle sorte que l'écoulement s'effectue dans une direction normale à celle-ci. De plus, cette région doit si possible correspondre à un régime uniforme et on évite les régimes numériquement instables tels que des écoulements brusquement variés (ressauts, etc.). Si, en plus, la relation naturelle entre le niveau et le débit est connue dans une région frontière, cette information facilitera par la suite la calibration du modèle.

Pour déterminer la densité locale de maillage, on procède à une analyse soignée de la bathymétrie du milieu, en accordant plus d'importance (densité de maillage) aux singularités tels que les canaux, chenaux, baies, contractions d'écoulement (ponts), entrées et sorties et voie maritime. Le maillage épouse approximativement la forme de ces singularités. Le maillage s'effectue en trois étapes:

- 1° tracé de super-éléments regroupant de un à 8 éléments triangulaires, numérisation et saisie;
- 2° découpage des super-éléments en éléments proprement dits, corrections et optimisation de la numérotation des noeuds;
- 3° numérisation et saisie des données bathymétriques et mise en correspondance avec les noeuds.

L'étape 2° est principalement réalisée par CAO graphique. Le logiciel utilisé est MOSAÏC développé conjointement à l'Université Laval, l'Université du Québec à Chicoutimi et l'Université de Technologie de Compiègne (FRANCE). Les illustrations des annexes ont cependant été produites avec HYGRAF développé à Laval.

3.2.1 Lac Saint-Louis

Le lac Saint-Louis (figure 11) a été délimité à l'amont par le chenal Sainte-Anne et le chenal Vaudreuil de part et d'autre de l'île Perrot. Dans le chenal Sainte-Anne, la limite a été fixée à l'amont des îles et de la marina. Dans le chenal Vaudreuil, la frontière du domaine se situe légèrement à l'amont de l'évacuateur de crue des Cèdres. À l'aval, le milieu est délimité à l'amont de la jetée Lachine ce qui correspond à un début d'accélération de la vitesse de l'eau. Le domaine a été maillé en 441 éléments. Plus d'éléments ont été affectés autour des îles de la Paix, du chenal Sainte-Anne de l'île Dorval, de même qu'à la centrale de Beauharnois. De plus, le maillage de la région du chenal maritime épouse étroitement les contours de celui-ci. Le même maillage a servi pour simuler les conditions actuelles et futures.

3.2.2 Le bief d'amenée

Le bief d'amenée a été maillé avec 460 éléments (figure 12). Sa forme longiligne assure une certaine étroitesse de bande du système algébrique final. Le milieu est délimité à l'amont autour de la limite aval du lac Saint-Louis (léger chevauchement de domaine). À l'aval, la frontière est donnée par la pointe amont de l'île du Diable ce qui correspond à l'amorce des rapides de Lachine proprement dits.

La densité du maillage est plus grande en face de la jetée Lachine à l'amont, dans la région des points de chemin de fer et Mercier et dans la zone d'approche de la future centrale et des ouvrages d'évacuation.

Le maillage correspondant à l'état futur (figure 13) est une version adaptée du maillage de l'état actuel. C'est pourquoi, plus d'éléments ont été prévus dans la région des ouvrages pour le maillage actuel.

3.2.3 Bassin La Prairie

Les limites amont du domaine ont été fixées à l'aval de la région numériquement instable (voir Dhatt et al, 1985) des rapides de Lachine. La pointe aval de l'île aux Hérons sert alors de borne pour cette frontière. La voie maritime est exclue du domaine. La zone amont du pont Victoria qui est une région de transition vers des vitesses plus rapides sert de limite aval du domaine.

Le bassin La Prairie a été subdivisée en 434 éléments (figure 14) avec une plus forte densité à l'amont de manière à améliorer la prise en compte des conditions aux limites. Le chenal de l'île des Soeurs, la région de l'estacade et du pont Champlain et la zone amont du pont Victoria ont aussi été privilégiés dans la répartition des éléments.

On notera également que le domaine futur est modifié notablement (figure 15) par rapport aux conditions actuelles. En effet, de nombreux remblais latéraux rétrécissent le domaine en particulier, le long de la digue délimitant la voie maritime. De même, il a été prévu d'aménager une île dans la région de hauts-fonds au centre du bassin. Quoique ces changements soient très significatifs, seule une adaptation sommaire du maillage et de la bathymétrie a été nécessaire pour simuler les conditions futures. Ces déblais proviendraient du creusement du canal de fuite de la centrale et de son canal d'amenée.

3.3 Bathymétrie

La bathymétrie de nos trois domaines a été spécifiée à partir des informations les plus actuelles colligées par R.S.W. (1985). Celles-ci étaient soit basées sur des données plus anciennes (ex.: lac Saint-Louis) ou obtenues plus récemment suite à des campagnes de mesures (bief d'amenée, aval du lac Saint-Louis, bassin La Prairie).

3.4 CHOIX DES PARAMÈTRES

3.4.1 Procédure

Notre approche consiste à définir des paramètres réalistes pour le modèle et de procéder à une simulation des phénomènes étudiés avec les conditions aux limites appropriées, habituellement les niveaux amont et aval. Un indicateur global d'adéquation du modèle hydrodynamique nous est d'abord fourni par la valeur du débit simulé. S'il y a correspondance avec le débit observé, on peut procéder à un examen plus détaillé des résultats. On cherche alors à vérifier la simulation de phénomènes précis tels que les macro-tourbillons, le partage des débits d'entrées, le profil de la ligne d'eau, les vitesses locales ou les trajectoires d'écoulement si l'information mesurée est disponible.

Parmi ces indicateurs, le profil de la ligne d'eau est sans doute le plus utilisé à cause de la présence de nombreuses stations limnimétriques disséminées sur les berges du milieu à l'étude (voir R.S.W., 1983).

3.4.2 Perte de charge - frottement

La calibration d'un modèle permet de définir la valeur des paramètres caractéristiques de ce milieu. On tente en général de définir des paramètres représentatifs d'une gamme aussi étendue que possible de phénomènes. On pourra par la suite extrapoler (ou interpoler) le modèle à des situations actuelles ou futures pour lesquels on ne dispose pas d'information. C'est la phase d'analyse approfondie (conditions actuelles) ou de prédiction (conditions futures).

Les paramètres de perte de charge du modèle sont le coefficient de frottement de Chézy et le coefficient de viscosité turbulente. Le premier, nous l'avons vu précédemment est fonction de la profondeur et de la rugosité représentée par le coefficient "n" de Manning (voir Dhatt et al, 1985a).

Idéalement, on pourrait déterminer n avec la granulométrie ($d_{3,5}$) des sédiments. En pratique, on peut se fonder sur une approche plus grossière tenant compte de la nature des sédiments, de la présence de plantes aquatiques, de la sinuosité (meandering) ou de contractions (ponts). Il est aussi utile de rechercher les études antérieures de courbes de remous. Quoique cette information ne représente qu'en moyenne transversale le frottement sur le lit, on en tire profit pour la modélisation 2-D.

La prise en compte bi-dimensionnelle des phénomènes d'écoulements (convergents, divergents) est effectuée par les termes de contraintes turbulentes de Reynolds. Ces termes sont d'autant plus importants dans le bilan des forces que la variation locale de la vitesse est grande. En général, on choisit le coefficient de viscosité turbulente le plus petit possible (autour de 1 à 10 m^2/s) soit, à la limite du seuil de convergence du modèle.

a) Valeurs retenues pour le "n" de Manning

Deux sources d'informations nous ont servi pour choisir ces coefficients: le rapport de Carballada (1982) et celui de RSW (1983). Pour simuler le lac Saint-louis avec un modèle aux différences conçu à l'origine par Lenderstsee (1967), Carballada, en accord avec Sydor M. d'Environnement Canada, utilise une fonction $n(H)$ croissante avec H décroissant (figure 16). Cette façon de procéder vise à prendre en compte correctement l'effet de la végétation aquatique (macrophytes) dans les zones de faible profondeur. Nous avons retenu cette approche à laquelle nous ajoutons, pour la zone du chenal Sainte-Anne les valeurs des paramètres retenus par RSW (1983). En général, dans cette zone ce sont les valeurs de ce rapport qui ont été retenues. Certaines simulations, cependant, ont nécessité des ajustements du n entre .060 et .085.

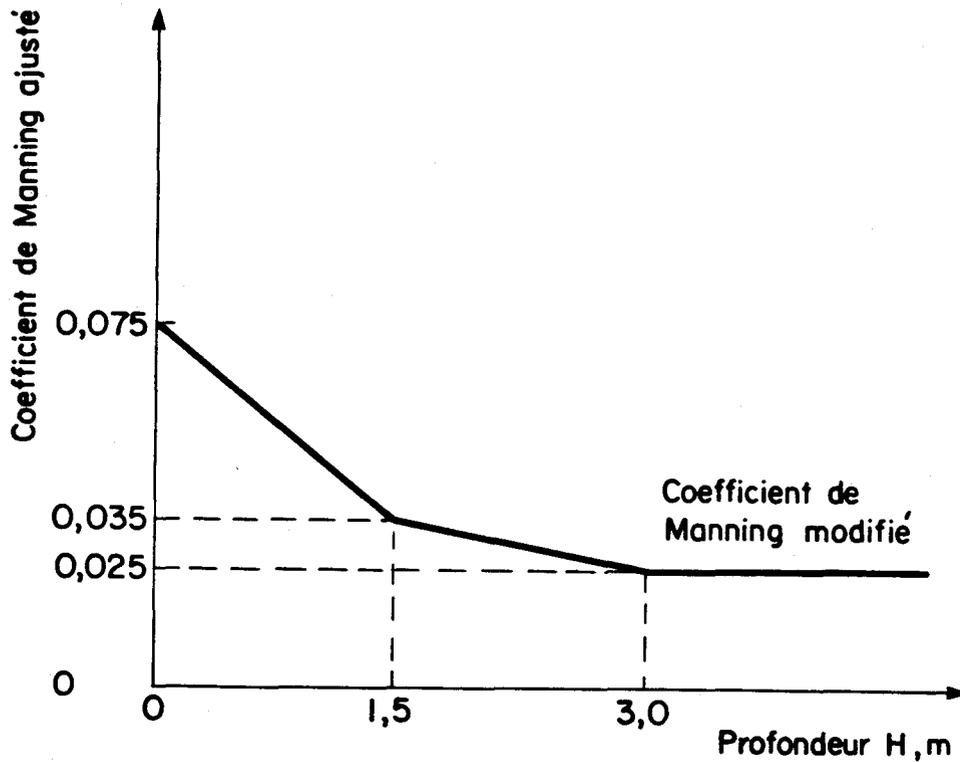


Figure 16: Variation du coefficient de Manning avec la profondeur totale - lac Saint-Louis (d'après Carballada, 1982)

Pour le bief d'amenée, les valeurs de RSW (1983) ont été retenues pour démarrer les simulations, les effets importants de compression visqueuse associés aux forts gradients de vitesse dans cette zone nous ont conduits à ajuster les coefficients de base. De même, l'effet de contraction des ponts Mercier et du chemin de fer sont pris en compte artificiellement par un frottement accru. Il s'agit en fait de convertir une perte par turbulence (accroissement local de la vitesse) en une perte équivalente produite par un frottement accru. La conversion s'effectue par calibration. On trouvera au tableau 4 la liste des coefficients de Manning retenus pour diverses conditions d'hydraulicité. Les conditions de frottement en régime aménagé sont spécifiées soit, égales au milieu actuel s'il n'y a pas de modification notable soit encore, à une valeur de .031 aux endroits excavés (canal de la jetée Lachine et canal d'amenée de la centrale).

Tableau 4: "n" de Manning pour le bief d'amenée selon l'hydraulicité (voir figures 17 et 18)

a) d'après R.S.W. (1983)

Section ¹	Étiage	Module	Crue 1/10 ans	Crue 1/100 ans
1 (10,0 à 2,0)	0,050	0,050	0,050	0,050
2 (20,0 à 10,0)	0,045	0,045	0,045	0,035
3 (20,0 à 10,0)	0,045	0,045	0,045	0,035
4 (28,0 à 20,0)	0,040	0,037	0,033	0,033
5 (30,0 à 28,0)	0,054	0,052	0,048	0,045

b) nos valeurs

Section ¹	Étiage	Module	Crue 1/10 ans	Crue 1/100 ans
1 (10,0 à 2,0)	0,044	0,041	0,041	0,041
2 (20,0 à 10)	0,039	0,036	0,036	0,036
3 (20,0 à 10)	0,053	0,050	0,050	0,050
4 (28,0 à 20,0)	0,031	0,028	0,028	0,028
5 (30,0 à 28,0)	0,046	0,043	0,043	0,043
6 (futur)		0,031		

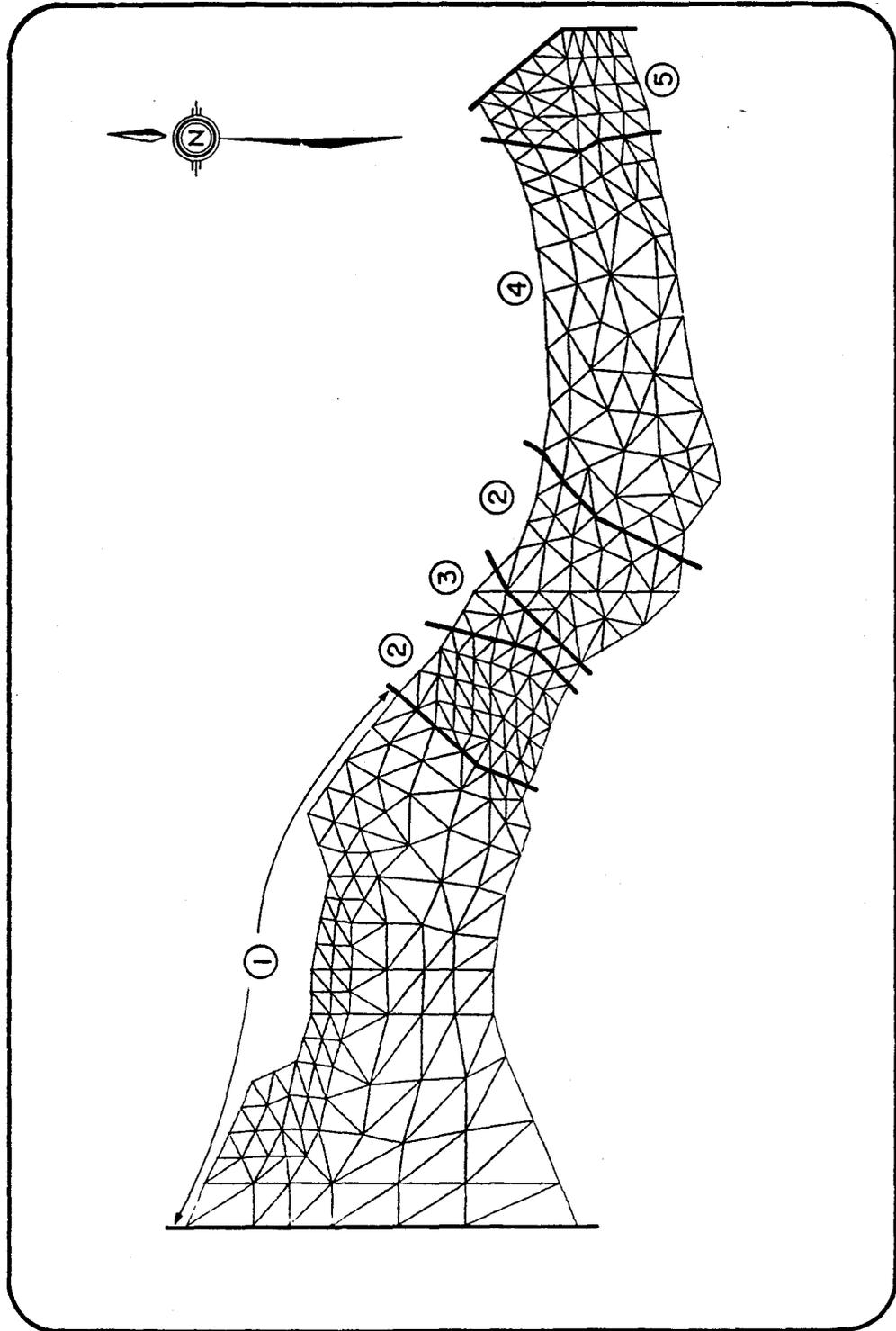


Figure 17a: Zones de frottement distinctes pour le "n" de Manning dans le bief d'amenée (adapté de R.S.W., 1983)

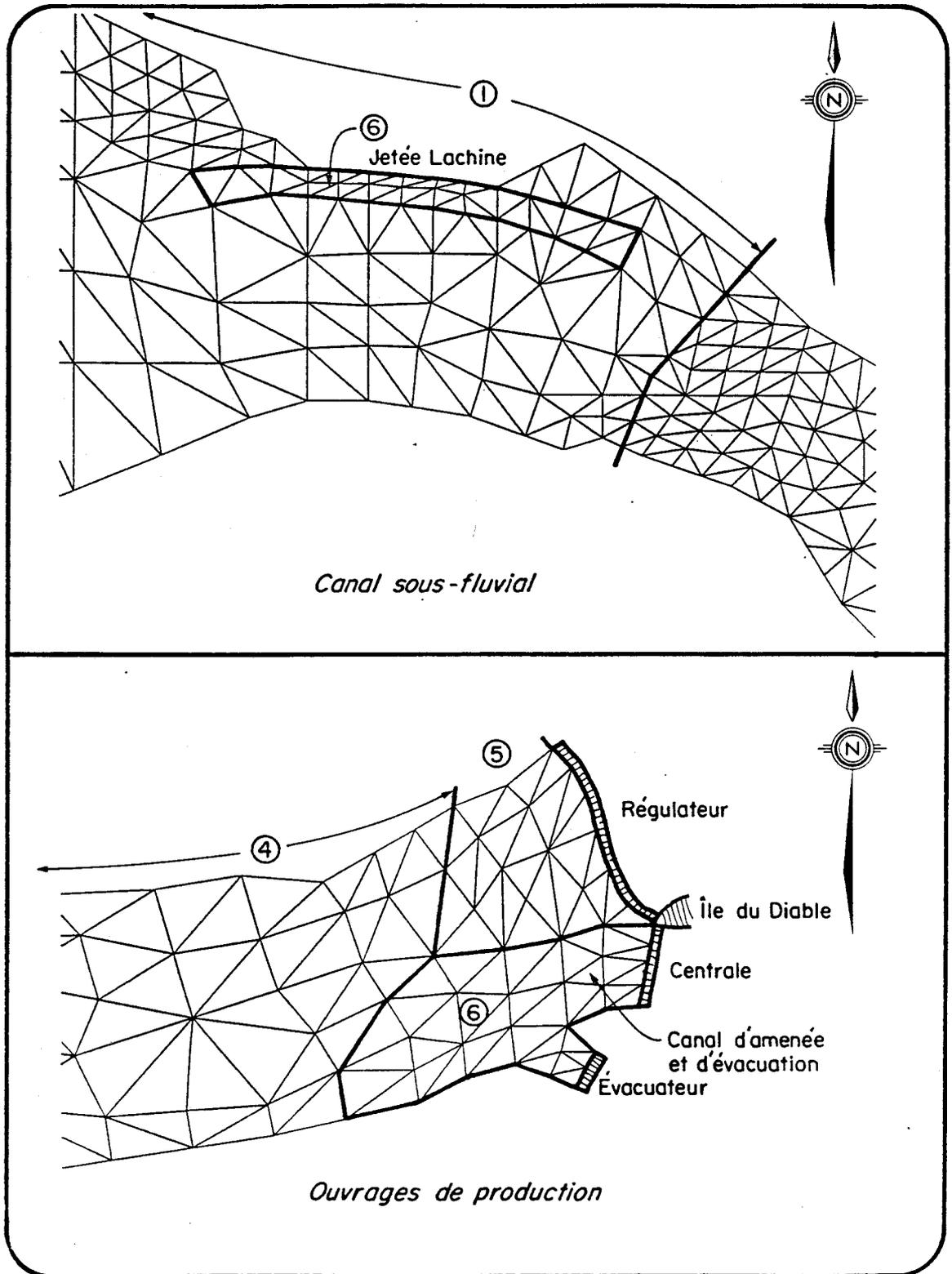


Figure 17b: Zones de frottement distinctes aux ouvrages dans le bief d'amenée

Figure 18: Définition des sections de R.S.W. (1983) pour le choix des coefficients de Manning "n" - bief d'aménée

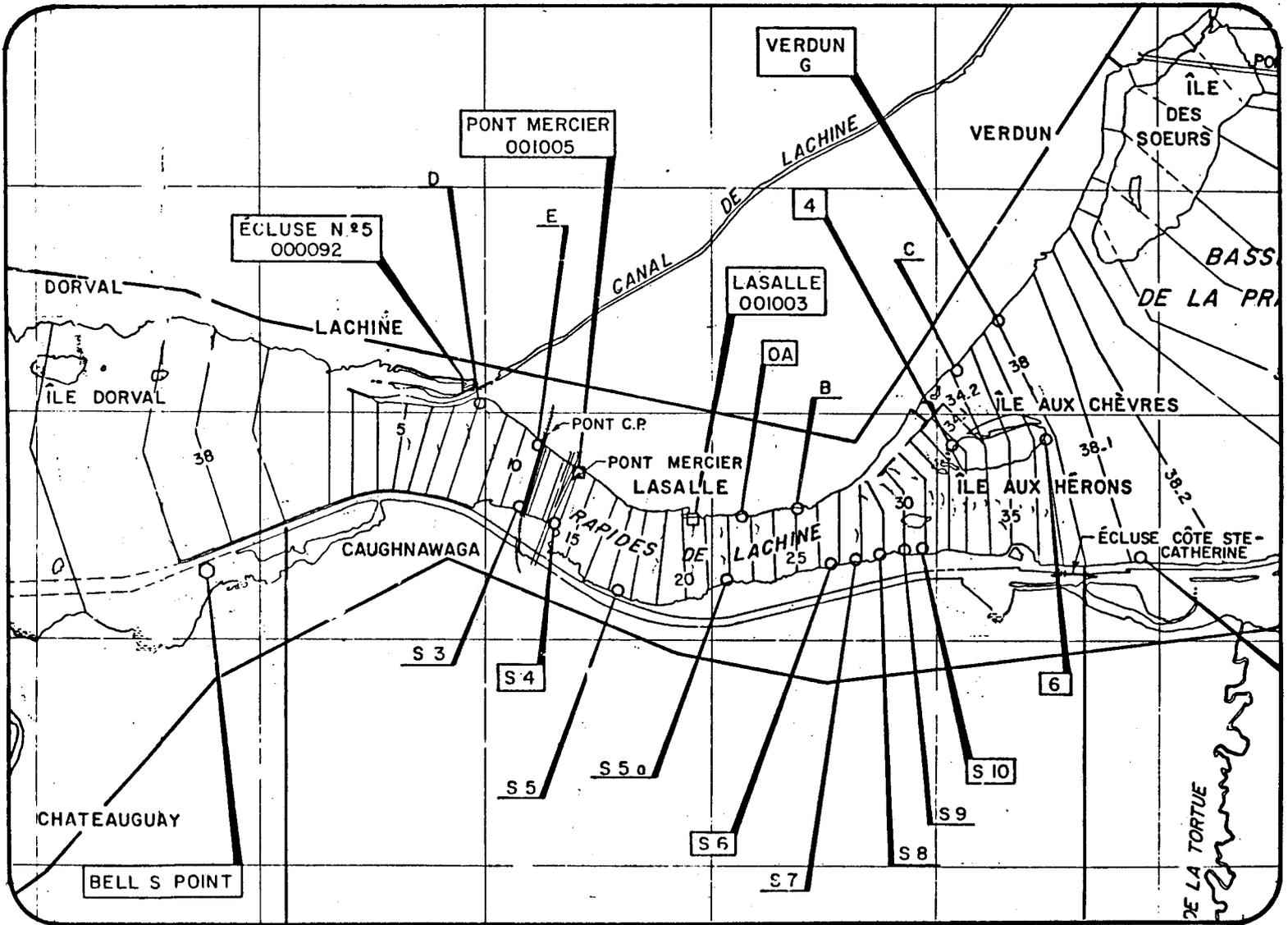


Tableau 5: "n" de Manning pour le bassin La Prairie selon l'hydraulicité
(voir figures 19a, 19b et c)

a) d'après R.S.W. (1983)

Section	Étiage (5 660)	Module (8 500)	Crue 1/10 ans 11 330
1 (38,12 à 38,4)	0,025	0,025	0,025
2 (38,4 à 38,2)	0,040	0,025	0,025
3 (38,2 à 38,1)	0,075	0,045	0,025
4 et 5	(non-spécifié)		

b) nos valeurs

Section	Étiage	Module	Crue 1/10 ans
1 (10,0 à 2,0)	0,018	0,023	0,024
2 (20,0 à 10)	0,028	0,023	0,024
3 (20,0 à 10)	0,063	0,038	0,024
4 (28,0 à 20,0)	0,071	0,048	0,045
et 5 (futur)			
6 (futur)		0,031	

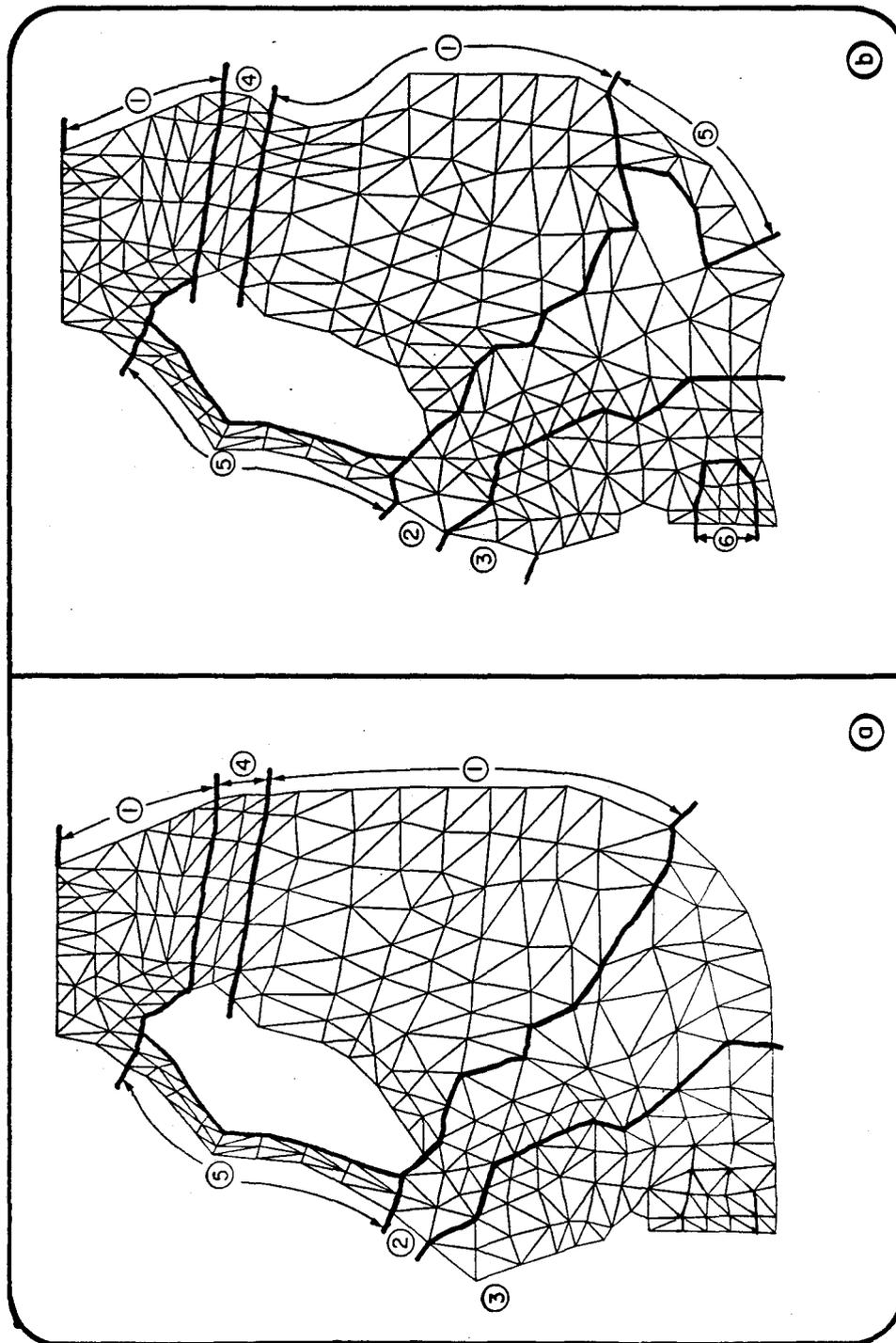


Figure 19: Zones de frottement distinctes dans le bassin de La Prairie
a) Conditions actuelles
b) Conditions futures (scénario 1)

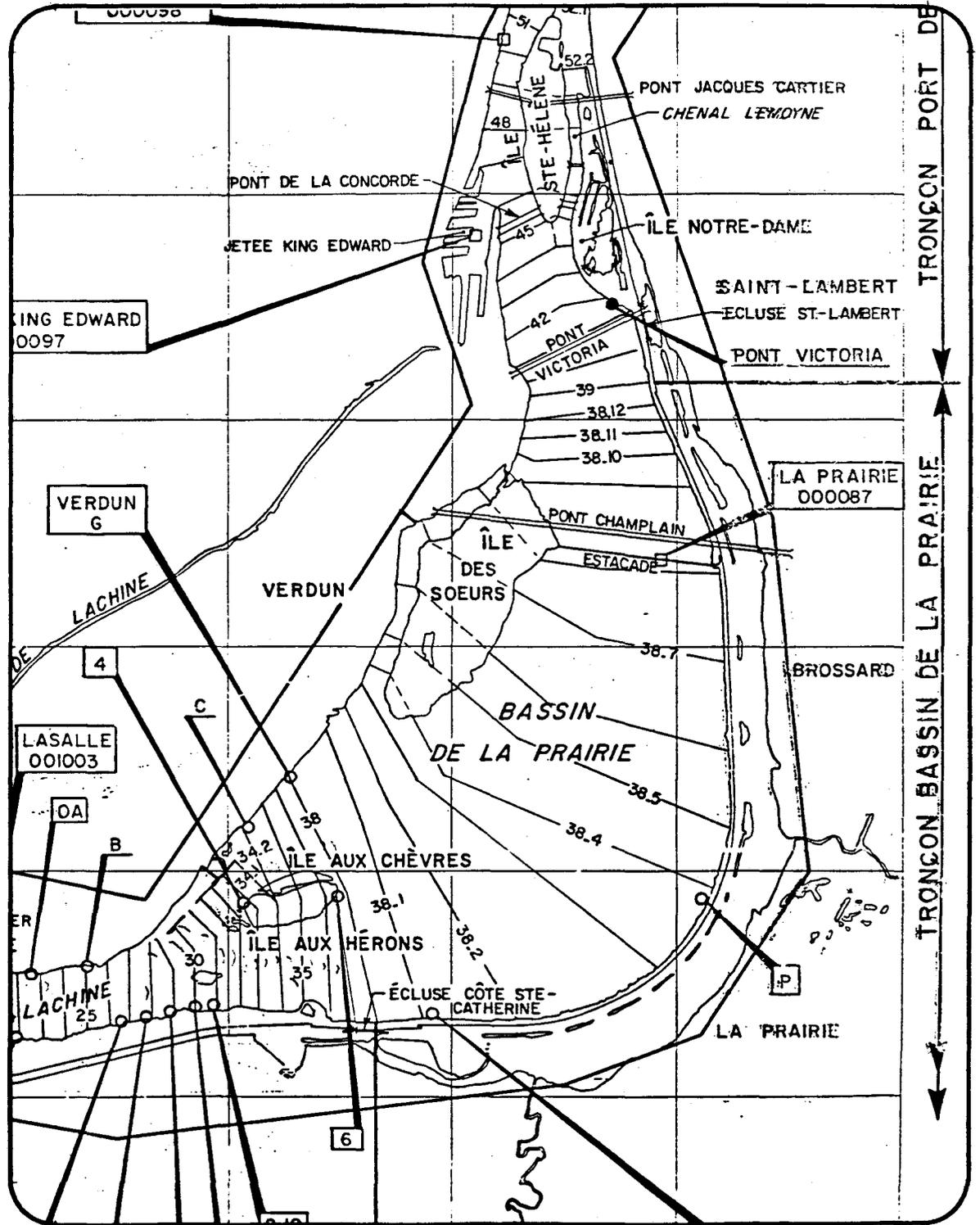


Figure 19c: Définition des sections de R.S.W. (1983) pour le choix du "n" de Manning dans le bassin La Prairie

Dans le bassin La Prairie, les résultats de R.S.W. (1983) ont également été utilisés avec, comme pour le bief d'amenée, une correction à la baisse pour compenser l'effet des compressions turbulentes. De même, nous avons tenu compte de l'effet de l'estacade et du pont Champlain par un surplus de frottement. Les conditions aménagées ne modifient pas sensiblement les conditions de frottement, sauf dans le chenal de la future île créée par des remblais au centre du domaine. On trouvera au tableau 5 la liste des coefficients retenus.

3.4.3 Choix des paramètres de mélange

Afin de bien mettre en lumière les différences de comportement des trois milieux concernés c'est-à-dire, le lac Saint-louis, le bief d'amenée et le bassin de La Prairie, tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions sur le plan des paramètres de diffusion. La méthode permettant de mieux représenter le phénomène du transport, parmi celles que nous avons expérimentées, implique qu'un premier calcul grossier soit fait avec une forte dispersion; en d'autres termes, le cône de mélange est assez ouvert, environ une quinzaine de degré, puis ensuite un calcul basé sur la propagation dans le temps permet de fermer cette zone de mélange sans pour autant faire apparaître des perturbations numériques trop importantes.

Le calcul initial est réalisé en utilisant une formule pour l'évaluation des coefficients de diffusion, connue sous le nom de formule de Taylor modifiée. Cette procédure a l'avantage d'ajuster localement ces coefficients en fonction des conditions hydrodynamiques plutôt que de forcer l'utilisation d'un coefficient constant sur l'ensemble du domaine.

$$\text{Taylor modifiée} \quad K = \alpha n |u| H^{5/6}$$

- α : coefficient d'ajustement en T
- n : coefficient de Manning
- u : vitesse
- H : hauteur d'eau totale

La deuxième étape consiste à considérer le problème comme évolutif dans le temps et de faire propager la solution, sans changer les conditions aux limites, jusqu'à ce qu'elle se stabilise d'elle-même. La norme entre deux pas de temps se situe à environ un dixième de un pourcent en dix itérations temporelles. Les coefficients choisis dans cette étape tiennent encore compte des conditions hydrodynamiques mais, en plus, de l'intervalle de temps retenu.

3.4.4 Relations niveaux-débits

Les conditions aux limites du modèle sont définies la plupart du temps en termes de niveau amont - niveau aval; parfois les vitesses sont ajustées de manière à garantir un débit donné. En procédant avec les niveaux on spécifie une sollicitation gravitationnelle puisque la dénivelée Δh exprime en fait l'action de la pression hydrostatique. Le choix des valeurs de niveau s'effectue à l'aide de relations niveau-débit. Les relations sont définies de manière univoque lorsque la section est dite de "contrôle", habituellement une transition graduelle de fluvial à critique. Nous avons délimité nos domaines de telle sorte que ce type d'information soit disponible au moins à l'aval.

La relation niveau-débit à l'amont est définie par la présence d'une section-contrôle à l'aval si l'écoulement y est fluvial. C'est le cas de tous les domaines étudiés. En général, nous disposons de mesures limnimétriques ou de courbes de remous (RSW, 1983) pour définir à l'état naturel la relation entre le niveau et le débit. Cette relation peut être modifiée si les caractéristiques de la section contrôle à l'aval le sont aussi. C'est le cas en conditions aménagées.

On trouvera aux figures 20, 21 et 22 les relations niveaux-débits utilisées pour la calibration du modèle pour les sections amont et aval des domaines étudiés. De même, on trouvera aux tableaux 7, 8 et 9 les niveaux qui ont été spécifiés comme conditions aux limites pour les diverses

conditions d'hydraulicité des trois domaines étudiés. Ces informations correspondent à des valeurs connues lorsqu'il s'agit des conditions naturelles. Par contre, pour les conditions futures, les niveaux sont déterminés en fonction du plan de gestion envisagé. Ainsi, dans le bief d'amenée, le plan de gestion nous permet d'imposer une valeur fixée du niveau à l'amont du domaine. Le niveau à l'aval est imposé de telle sorte que le modèle transite le débit nécessaire au plan de gestion. Dans ce cas, le niveau obtenu est la réponse au problème posé plutôt qu'une donnée de base.

On notera peut-être des écarts entre les niveaux du plan de gestion du lac Saint-Louis et l'amont du bief d'amenée alors que ceux-ci devraient concorder. Cette situation est imputable à l'évolution des hypothèses de plan de gestion pendant la réalisation du projet et il nous a été impossible, vu les courts délais du projet de procéder à une mise à jour de nos simulations. Les niveaux relatifs à la centrale, au régulateur et à l'évacuateur ont été imposés dans le but d'obtenir un partage du débit fixé par le plan de gestion. L'obtention d'une solution pour des conditions normales d'hydraulicité est relativement compliquée dans un tel domaine. Dans les conditions modifiées, le partage du débit est très sensible au choix du niveau d'eau et quelques centimètres de dénivellation transversale peuvent complètement modifier le partage du débit. Le modèle est très sensible à ce phénomène reflétant en cela, la réalité physique.

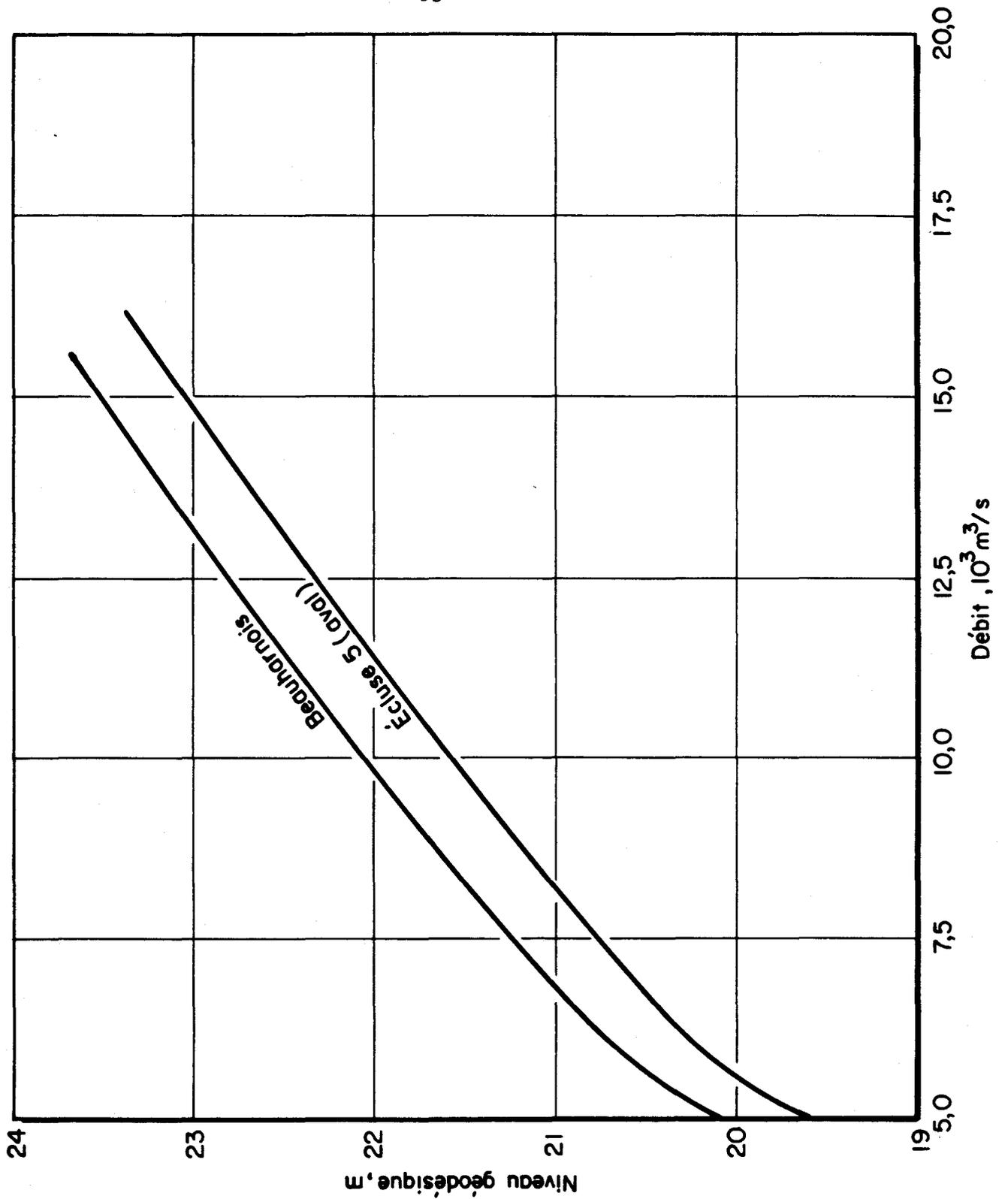


Figure 20: Relations niveau-débit actuelles aux extrémités du lac Saint-Louis (adapté de R.S.W., 1983)

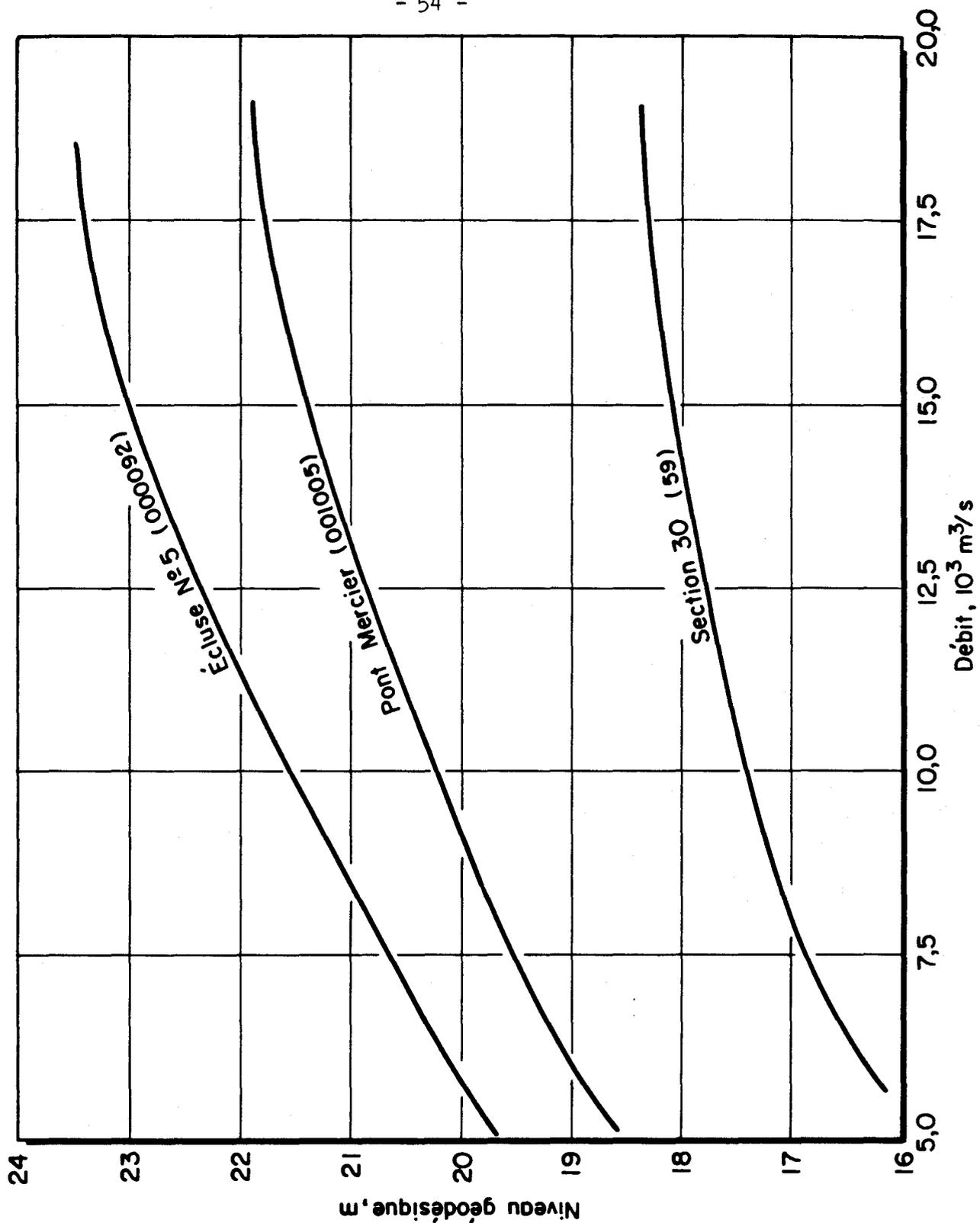


Figure 21: Relations niveau-débit actuelles aux extrémités du bief d'amenée (d'après les courbes de remous de R.S.W., 1983)

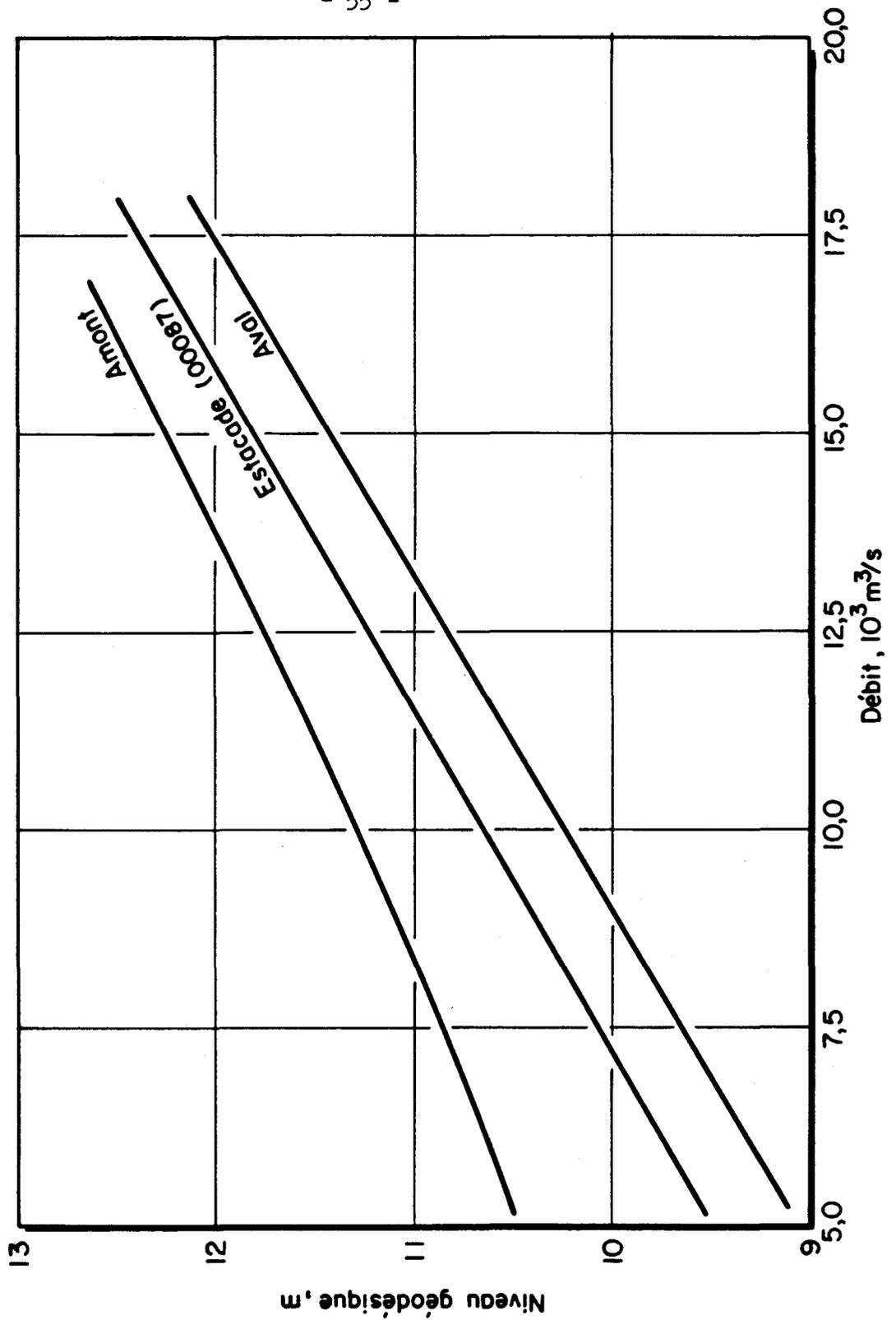


Figure 22: Relations niveau-débit actuelles aux extrémités du bassin La Prairie (d'après les courbes de remous de R.S.W., 1983)

Tableau 6: Niveaux¹-cibles en conditions actuelles et futures - Lac Saint-Louis

a) Conditions actuelles

Portion de domaine	Étiage	Module	Crue 1/10	Crue 1/100
Beauharnois	20,85	21,45	22,65	23,39
Les Cèdres	20,85	21,46	22,66	23,40
Sainte-Anne	-20,85	-21,50	22,55	23,50
Vaudreuil	20,85	21,46	22,67	23,40
Rapides (Ecluse #5)	20,35	21,00	22,30	23,00
Pointe-Claire	20,75	21,35	22,60	23,30

b) Conditions futures²

Portion de domaine	Étiage	Module	Crue 1/10	Crue 1/100
Beauharnois	21,50	21,90	22,10	22,60
Les Cèdres	21,50	21,91	22,11	22,61
Sainte-Anne	21,50	22,00	22,20	22,70
Vaudreuil	21,50	21,92	22,12	22,62
Rapides (Ecluse #5)	21,15	21,50	21,60	22,10
Pointe-Claire	21,40	21,80	22,00	22,50

¹ niveau géodésique

² Objectifs du plan de gestion ou valeurs extrapolées.

Tableau 7: Niveaux-cibles actuels¹ et futurs - bief d'amenée (adapté de R.S.W., 1983 ou proposé dans le plan de gestion futur)

a) Conditions actuelles

Site	Étiage	Débit Module	Crue 1/10	Crue 1/100
Entrée: Écluse #5	20,35	21,00	22,30	23,00
Sortie: (Section S9) ¹	16,60	17,15	17,75	18,00
Pont Mercier (001005)	19,05	19,15	20,85	21,35

b) Conditions futures

Site ²	Étiage	Débit Module	Crue 1/10	Crue 1/100
Entrée: Écluse #5	21,15	21,50	21,95	22,35

¹ Voir aussi la figure 21.

² Les niveaux à l'aval ne peuvent être définis comme des valeurs-cibles. Ils sont tout de même fixés de manière à garantir un débit-cible. Nous verrons au chapitre suivant comment nous avons procédé.

Tableau 8: Niveaux-cibles actuels¹ et futurs - bassin La Prairie

a) Conditions actuelles

Site	Étiage	Module	Crue décennale
Entrée			
- nord	10,75	11,00	11,68
- sud	10,75	11,00	11,74
Sortie	9,45	9,90	10,80
Étacade (00087)	9,90	10,30	11,20

b) Conditions futures²

Site	Étiage	Module	Crue décennale
Sortie	9,45	9,90	10,80

¹ Voir aussi la figure 22.

² Dans ce cas, seul le niveau aval pouvait être fixé comme niveau-cible. Les niveaux amont sont un résultat de l'application du modèle comme nous le verrons au chapitre suivant.

4.0 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Comme nous l'avons mentionné auparavant, notre démarche consiste globalement à acquérir un modèle fiable (calibration) puis à l'extrapoler pour les conditions futures.

4.1 CALIBRATION

4.1.1 Modèle hydrodynamique - principe

Dans un écoulement du type étudié, diverses classes de phénomènes peuvent servir pour la calibration:

Les macro-phénomènes:

- profil de la ligne d'eau
- relation niveau-débit

Les méso-phénomènes

- grands tourbillons
- pertes de charges par singularités importantes (ponts)
- trajectoires d'écoulement
- ordre de grandeur des vitesses moyennes

Les micro-phénomènes

- vitesses sur le littoral
- turbulences locales
- pertes locales

Dans tout modèle comme celui que nous utilisons, les micro-phénomènes ne sont pas reproduits. Nous avons généralement à notre disposition des modèles dits de conditions moyennes c'est-à-dire, pour lesquelles les variations aléatoires ou locales sont considérées comme nulles "en moyenne".

Le principe de la calibration ne va donc pas au-delà de la reproduction satisfaisante des macro et méso-phénomènes. Nous allons donc présenter nos résultats dans cette perspective. D'autre part, on peut considérer que la reproduction de la ligne d'eau et de la relation niveau débit est une condition sine qua non de calibration du modèle hydrodynamique. Nous n'allons pas présenter ces résultats de manière détaillée. Mentionnons simplement que pour des niveaux absolus imposés à l'amont et à l'aval d'un domaine donné, le débit devait être reproduit aussi exactement que possible. La marge de manoeuvre reposait donc sur le coefficient de frottement de Manning que nous ajustons localement (échelle méso) jusqu'à l'obtention du débit souhaité.

4.1.2 Mélange des eaux - principe

Tous les calculs ont été réalisés en concentration relative (1,0 pour l'Outaouais et 0,0 pour le fleuve). Pour le lac Saint-Louis une concentration unitaire a donc été imposée de part et d'autre de l'île Perrot et nulle pour les deux entrées du fleuve. En ce qui concerne le bief d'amenée, l'absence de données précises correspondant aux conditions hydrodynamiques étudiées nous a contraint à imposer pour tous les cas un profil de concentration semblable à ceux observés à la Pointe Stony (voir rapport de Côté, 1983). Enfin, les conditions du bassin de La Prairie sont beaucoup plus hypothétiques mais sont les mêmes pour tous les cas.

Comme pour le modèle hydrodynamique, nous calibrons le modèle de mélange par comparaison avec certaines situations de référence (mesures) les mieux adaptées possibles c'est-à-dire, les conditions d'écoulement typiques du milieu. Le macro-phénomène servant de critère de validité est primordialement la zone de séparation des deux écoulements dont on étudie le mélange. Pour les fins de l'examen de nos résultats, la concentration relative de valeur 0,5 a été choisie pour représenter cette limite. Cette approche privilégie l'aspect transport du phénomène plutôt que la dispersion, reflétant ainsi la part relative de ces divers phénomènes dans le milieu lui-même. En effet, dans des milieux peu profonds et à fort débit tels que

ceux à l'étude, l'eau en provenance de diverses sources à l'amont est très rapidement transportée vers l'aval et a peu de chance de vraiment se mélanger latéralement en particulier dans le lac Saint-Louis-amont ce qui n'empêche pas la dilution dans la direction longitudinale de l'écoulement.

Plusieurs facteurs peuvent jouer sur la qualité des résultats obtenus dans cette étude rapide du problème du mélange des eaux dans la zone du projet Archipel. Nous les énumérerons ci-après, mais avant cela, il convient de faire une mise en garde importante qui aidera à tirer de ces résultats le meilleur profit, en particulier pour l'aspect particulier de la dispersion.

L'analyse de ces schémas de mélange ne doit pas se faire en valeur absolue mais bien en valeur relative, c'est-à-dire que l'on doit plutôt chercher à apprécier par comparaison les effets et leur amplitude des modifications des régimes et des géométries. Les principales raisons de ceci découlent des faits suivants:

- les conditions aux limites sont approximatives fautes de données adéquates;
- les conditions hydrodynamiques pour lesquelles des mesures ont été prises ne correspondent pas vraiment, en terme de valeurs et de partage des débits, aux conditions simulées, d'où un calage peu précis;
- le découpage en éléments finis à surtout été fait en fonction du calcul hydrodynamique et manque de précision pour le calcul du mélange surtout dans la zone concernée par la proximité d'eau de qualités différentes.

4.1.3 Estimation du débit

Le débit transité par le modèle au cours d'une simulation est estimé par la méthode dite du trapèze exposée dans TAO-Simulations, (1985a) (voir l'annexe 3). Cette méthode peut être relativement juste dans la mesure où

les vitesses sont fiables dans la section choisie. Il est préférable alors de choisir une section d'écoulement éloignée d'au moins un élément d'une frontière ouverte. En effet, il est généralement reconnu que la valeur des vitesses calculées perd de la fiabilité à mesure que l'on se rapproche des frontières du domaine. L'utilisation de vitesses calculées sur la frontière peut entraîner des erreurs de l'ordre de 5% sur le calcul des débits. Une méthode de calcul qui utilise la moyenne de deux ou trois sections légèrement à l'amont ou à l'aval d'une frontière ouverte (TAO Simulations, 1985b) donne des résultats beaucoup plus précis avec une erreur inférieure à 1%. En ce qui nous concerne, (la présente étude), le débit de toutes les simulations a été estimé par une technique qui consiste à prendre la moyenne de la somme des entrées et de la somme des parties. C'est ce débit qui devait concorder avec le débit-cible. Au moment de l'étude, notre connaissance du phénomène des erreurs de frontière n'était pas connu. C'est pourquoi dans la présente étude, les vitesses pour le calcul de débit ont été puisées sur la frontière et que l'erreur sur le débit pourrait atteindre 5% en pourcentage si l'erreur à l'entrée allait dans le même sens que l'erreur à la sortie. Toutefois, ce type d'erreur étant tout à fait aléatoire, nous estimons qu'en pratique l'écart devrait être inférieur à 3% en moyenne. Quand on considère que les événements hydrologiques sont eux-mêmes entâchés d'une erreur de l'ordre de 5% en moyenne (Villeneuve et al, 1973) dû aux techniques de mesure, nous pouvons affirmer que notre méthode donne des résultats tout à fait satisfaisants.

4.2 LAC SAINT-LOUIS

4.2.1 Hydrodynamique

Le lac Saint-Louis est le milieu où le plus d'informations sont disponibles pour fins de calibration (voir Carbalada, 1982). Les niveaux mesurés à Pointe-Claire (niveaux-cibles du tableau 6) et les niveaux simulés au même endroit sont comparés dans le tableau suivant et montrent une très bonne correspondance.

Tableau 9: Comparaison des niveaux mesurés et simulés à Pointe-Claire-Lac Saint-Louis

Niveau	DÉBIT			
	Étiage	Module	Crue 1/10 ans	Crue 1/100 ans
Niveau-cible(m)	20,75	21,35	22,60	23,30
Niveau simulé (m)	20,78	21,38	22,59	23,30
Écart (m)	+0,03	+0,03	-0,01	0,0

Pour les fins de la calibration, nous avons également comparé nos résultats avec certaines informations relatives au débit-module disponibles par Carballada (1982).

- présence d'un tourbillon important à droite de l'écoulement à la sortie de Beauharnois;
- les trajectoires d'écoulement et l'ordre de grandeur des vitesses au large de l'île Saint-Bernard à l'embouchure droite de la Chateauguay;
- les trajectoires et vitesses entre Sainte-Anne de Bellevue et l'île Dowker dans le chenal Sainte-Anne;
- les trajectoires d'écoulement dans le chenal maritime.

Nous avons regroupé en annexe IV différentes figures montrant les informations disponibles.

Sans entrer dans le détail, on note une très bonne correspondance de nos résultats tant en ce qui concerne les trajectoires d'écoulement que pour l'ordre de grandeur des vitesses. Ces constats confirment la valeur prédictive du modèle utilisé puisque très peu d'ajustement de paramètre a été nécessaire pour l'obtention de ces résultats. De même, on peut affirmer sans crainte que les résultats des vitesses obtenus pour les autres débits ont un degré égal de fiabilité dans l'ensemble.

4.2.2 Mélange des eaux

Dans le Lac Saint-Louis, divers événements mesurés peuvent servir de base de comparaison aux fins de calibration du modèle de mélange. Cependant, il est difficile de trouver dans la bibliographie les situations précises pouvant fournir des conditions exactement comparables aux données utilisées pour nos simulations (Côté, 1983). En examinant les choix possibles, nous avons cherché à reproduire le mieux possible le partage relatif des débits respectifs de l'Outaouais et du Saint-Laurent. Nous avons choisi de nous comparer avec les résultats interprétés des images Landsat rapportées dans Côté 1983 (figure 23). Les données des événements-cibles sont présentées au tableau 10.

Nous avons porté sur la figure 23 nos résultats pour le débit module et la crue décennale (partage B). L'information portée en graphique a été obtenue, rappelons-le, en déterminant le lieu de concentration relative, 5. Deux débits nous ont servi pour cette calibration: le débit module et la crue décennale (partage B). On trouvera au tableau 11, un rappel des conditions d'hydraulicité relative à ces événements.

Quand on examine la figure 23 on constate que dans l'ensemble nos simulations reproduisent correctement la ligne de partage des eaux entre l'Outaouais et le Saint-Laurent. Toutefois, cette ligne de partage a tendance dans nos simulations à joindre l'île Perrot légèrement plus au sud qu'elle ne le devrait. Cette divergence reste cependant assez localisée.

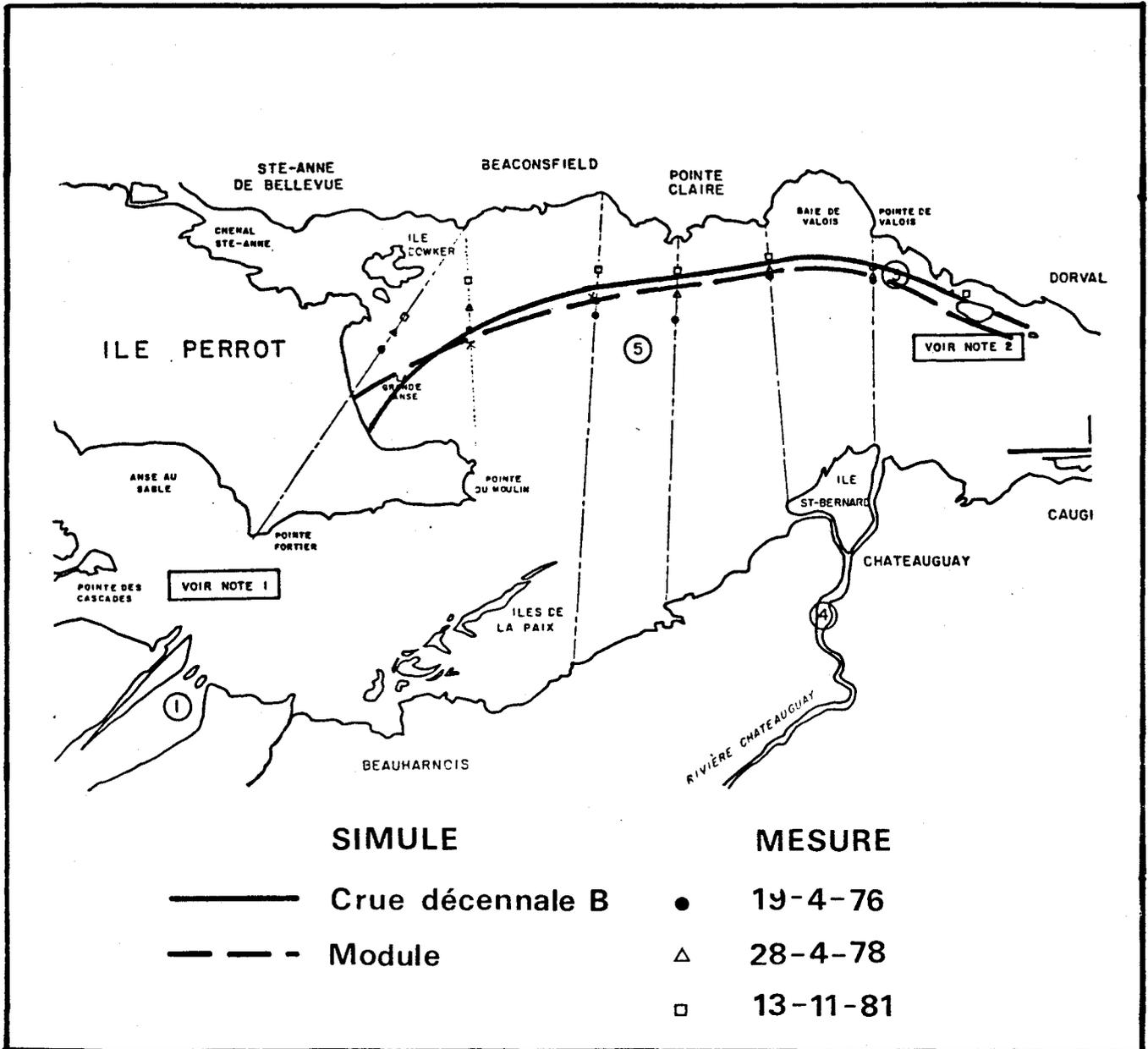


Figure 23: Comparaison des lignes de partage des eaux de l'Outaouais et du Saint-Laurent d'après des images Landsat et nos simulations (les courbes sont obtenues à partir de l'analyse des planches LSL.A.MOD.04 et LSL.A.CR10.B.04 pour le module et la crue décennale respectivement)

Tableau 10: Conditions d'hydraulicité du Lac Saint-Louis aux dates indiquées des images LANDSAT de référence (rapporté par Côté, 1983)

Endroit	Débit (m ³ /s)		
	Date		
	76-04-19	78-04-28	81-11-13
A- Chenal Sainte-Anne	1 309	757	515
B- Chenal Vaudreuil	1 046	565	291
C- Les Cèdres	1 917	2 566	1 574
D- Beauharnois	7 250	6 665	7 112
A + B + C + D	11 522	10 533	9 492
Apport relatif	Pourcentage		
$(A + B)/(A + B + C + D)^1$	20	12,5	8,5

¹ Outaouais/fleuve Saint-Laurent à Pointe-Claire.

Tableau 11: Conditions d'hydraulicité du Lac Saint-Louis pour fins de calibration du mélange des eaux

Endroit	Débit	
	Module	Crue décennale partage B
A- Chenal Sainte-Anne	556	1 058
B- Chenal Vaudreuil	348	859
C- Les Cèdres	940	2 966
D- Beauharnois	6 430	7 323
TOTAL ¹	8 274	12 206
Apport relatif	Pourcentage	
$\frac{A + B}{A + B + C + D}$	10,9%	15,6%

¹ Excluant Chateauguay

Nous avons constaté lors de nos simulations que cette zone d'écoulement est très instable et qu'une très légère modification du niveau d'eau relatif de part et d'autre de l'île Perrot peut causer un déplacement très significatif de cette ligne.

4.3 BIEF D'AMENÉE

4.3.1 Hydrodynamique

Les données disponibles sur le bief d'amenée ne vont pas plus loin que la connaissance des niveaux, en particulier au pont Mercier (Tableau 12). La dénivellation totale pour l'ensemble du domaine varie de 3,75 m pour l'étiage décennal à 5,0 m pour la crue centennale. Au pont Mercier, le niveau est relativement difficile à ajuster très précisément étant donné qu'il s'agit d'une zone de contraction et qu'on y trouve des pertes locales importantes. Nos résultats sont cependant relativement bons en particulier pour le débit module (écart de ,05 m par rapport aux mesures). Pour les autres débits, l'écart entre nos simulations et les mesures reste dans une marge acceptable compte tenu des conditions hydrodynamiques particulièrement rapides dans ce bief.

Tableau 12: Comparaison des résultats du modèle avec les niveaux-cibles pour le bief d'amenée au pont Mercier (station 001005)

Niveau	DÉBIT			
	Étiage	Module	Crue 1/10 ans	Crue 1/100 ans
Mesuré	19,05	19,75	20,85	21,35
Simulé	10,20	19,80	21,10	21,45
Écart (m)	+0,15	+0,05	+0,25	+0,10
Dénivellation totale	3,75	3,85	4,55	5,0

4.3.2 Mélange des eaux

Les éléments de calibration du modèle de mélange dans le bief d'aménée sont présentés à la section 4.4.2.

4.4 BASSIN LA PRAIRIE

4.4.1 Hydrodynamique

Dans le bassin La Prairie, on disposait pour vérifier notre modèle des données de niveaux au droit de l'estacade. De plus, on avait une mesure du partage relatif des débits (débit module) entre le bras nord et le bras sud des rapides de Lachine à l'amont du domaine. Nos simulations (tableau 13) reproduisent de manière très satisfaisante les niveaux à l'estacade ($\pm 0,05$ m) pour les différents débits simulés. En ce qui concerne le partage des débits à l'amont, une répartition de 41% - 59% a été obtenue entre le bras nord et le bras sud (voir aussi le tableau 3 sur les conditions typiques d'hydraulicité), ce qui nous autorise à admettre la valeur du modèle dans l'ensemble. En ce qui concerne les autres conditions d'hydraulicité (étiage, crue décennale), des indications quant au partage des débits nous ont été fournies par Hydro-Québec (direction environnement). Ces valeurs données au tableau 3 répartissent le débit ainsi: 39% - 61% pour l'étiage et 36% - 64% pour la crue décennale pour un total de 100% qui exclut la part du débit qui transite hors domaine (voie maritime). Nos résultats répartissent le débit ainsi: 40,7% - 59,3% pour l'étiage et 36% - 64% pour la crue ce qui correspond de très près aux valeurs recherchées.

Tableau 13: Comparaison des résultats du modèle avec les niveaux-cibles pour le bassin La Prairie - à l'estacade (00087)

Niveau	DÉBIT		
	Étiage	Module	Crue 1/10 ans
Mesuré	9,90	10,30	11,20
Simulé	9,85	10,35	11,25
Écart (m)	-0,05	+0,05	+0,05
Dénivellation totale	1,30	1,10	≈,90

4.4.2 Mélange des eaux

Très peu de données nous permettent d'établir une corrélation précise entre des mesures naturelles et les résultats du modèle. Cependant des traits caractéristiques à ces deux milieux peuvent être découverts à l'analyse des quelques mesures présentées dans le rapport de Côté (1983). Les mesures correspondent à un débit légèrement supérieur au module. La figure 24 extraite de ce rapport présente en effet des valeurs de la concentration relative en rive nord d'où il ressort les faits suivants:

- a) La concentration est encore à $\approx 1,0$ en rive nord près de l'île Dorval, soit à l'amont du bief d'amenée; à l'aval, on retrouve une concentration de 0,5 un peu à l'amont de l'île des Soeurs. On peut donc conclure que la zone du bief présente des caractéristiques de mélange longitudinal assez importantes.
- b) Dans le bassin de La Prairie, les concentrations observées en rive nord sont constantes que ce soit dans le chenal de l'île des Soeurs ou bien le littoral sud-est de cette dernière. Le mélange longitudinal dans cette zone semble donc peu important.

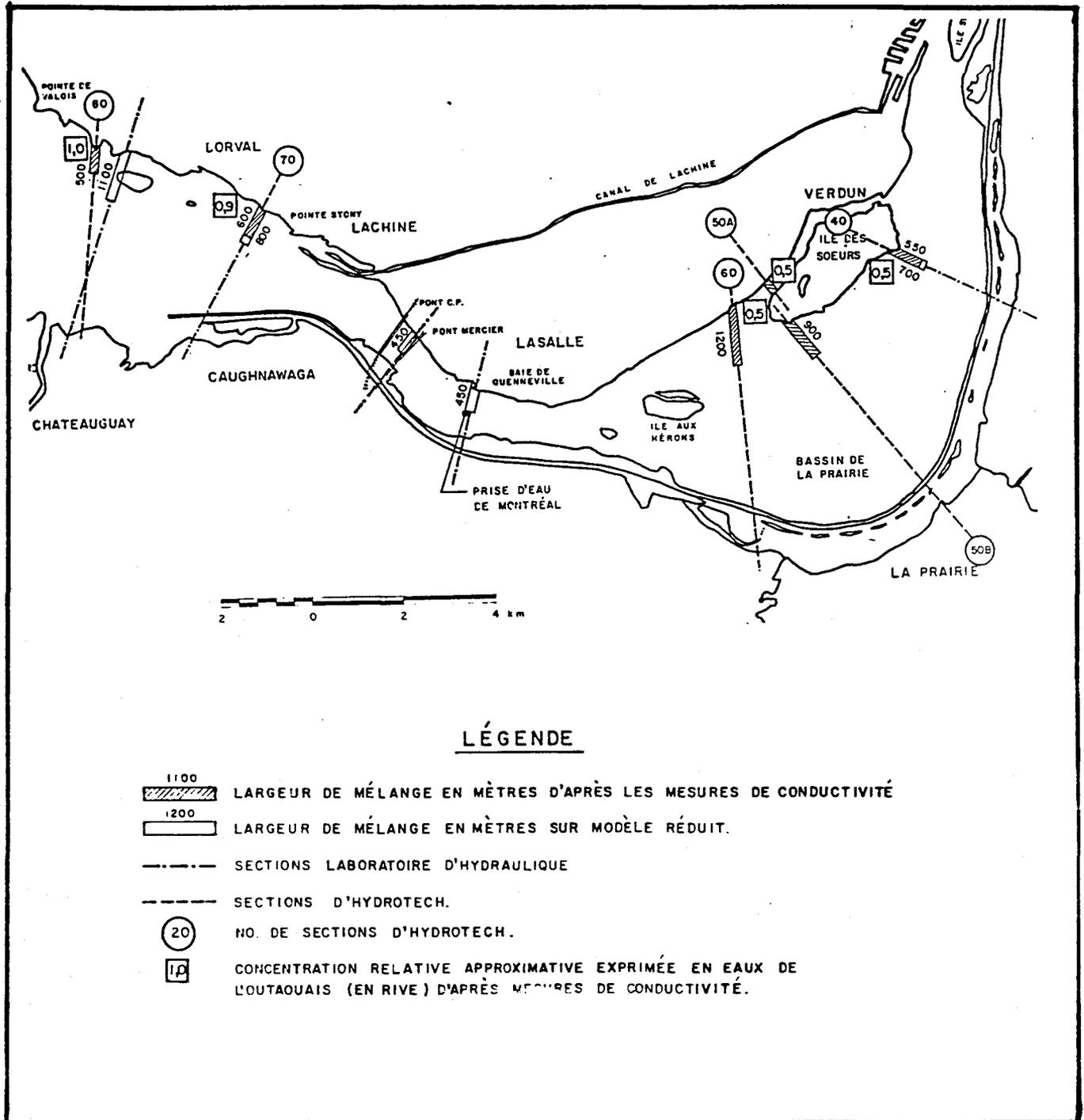


Figure 24: Conditions de référence du mélange des eaux dans le bief d'amenée et le bassin La Prairie (débit 9 307 m³/s)

L'examen des résultats du modèle (planches BAM.A.***.05 et LPR.A.***.05) nous permet de tirer des conclusions fort semblables. En effet, nous constatons que le mélange longitudinal existe, probablement par un phénomène de dispersion, dans le bief d'amenée, la concentration en rive passant de 1 à 0,5 de l'amont vers l'aval (lien avec le courant en rive?). D'autre part, dans le bassin de La Prairie, toute la zone rive nord et de l'île des Soeurs reste à une concentration constante; la bande de transition entre les deux eaux ne tend pas à s'élargir et reste presque constante dans la direction longitudinale.

Se basant sur ces faibles indices nous pouvons cependant conclure que le modèle simule très bien les caractéristiques spécifiques à chaque milieu et ceci dans des conditions de calcul et de sollicitations identiques.

4.5 PRÉDICTION

La démarche prédictive repose sur les hypothèses suivantes:

- le modèle utilisé est calibré sur le comportement réel du milieu actuel;
- les changements prévus aux conditions actuelles restent dans une gamme de valeurs comparables de telle sorte que le modèle puisse être extrapolé;
- dans le cas contraire, des ajustements appropriés aux paramètres sont apportés et ceux-ci sont dorénavant considérés comme représentatifs de la nouvelle réalité.

4.5.1 Hydrodynamique

Dans le cas du Lac Saint-Louis, aucun changement vraiment significatif au milieu physique actuel ne nécessite une remise en question du choix des paramètres du milieu actuel. Le seul changement en fait, concerne les niveaux d'eau auxquels sont transitées les diverses gammes de débit. Ces changements sont relativement mineurs et la loi de frottement utilisée pour

choisir le "n" de Manning tient compte explicitement de la hauteur d'eau totale ($H + h$). Il y a donc tout lieu de croire à la validité des résultats prédictifs.

Le bief d'aménée se voit imposer deux classes de changements: d'abord des ouvrages et excavations dans le lit (canal sous-fluvial à l'amont, canal d'aménée et barrages à l'aval) et des règles de gestion modifiant significativement le niveau d'eau. Dans ce domaine, les changements physiques du lit sont aisément pris en compte par un choix approprié du coefficient de Manning ainsi que nous l'avons vu à la section sur le choix des paramètres.

Le surcreusement du lit à l'aval a pour effet de ralentir considérablement les vitesses dans cette zone ce qui se traduit par une réduction très importante de la perte de charge. Le modèle dans cette région devient alors beaucoup moins sensible au choix des paramètres ce qui accroît par conséquent la fiabilité du modèle.

Pour la partie médiane et amont du domaine, les modifications des conditions physiques d'écoulement peuvent être considérées comme incluses dans une gamme acceptable. D'ailleurs, on se rend compte à l'examen du tableau 4 que le choix des paramètres pour le milieu actuel est relativement constant quel que soit le niveau d'hydraulicité étudié. Ce constat nous autorise à extrapoler le choix des paramètres et considérer le modèle comme valide pour les conditions futures.

Le cas du bassin La Prairie est relativement simple à traiter du point de vue prédictif. Ce cas est mitoyen entre le Lac Saint-Louis et le bief d'aménée. En effet, il s'agit d'un milieu lacustre comparable au Lac Saint-Louis d'une part; d'autre part des aménagements importants sont susceptibles de modifier les conditions d'écoulement (creusement du lit pour le canal de fuite de la centrale à l'amont du domaine, nombreux remblais sur la berge sud-est et sur les haut-fonds du centre du bassin). À mesure qu'on progresse vers l'aval, ces changements deviennent mineurs et dans cette zone le modèle actuel peut aisément être extrapolé.

Deux zones méritent une attention particulière pour le choix des coefficients de Manning: l'aval du canal de fuite et le chenal entre la nouvelle île créée par des remblais et le littoral. Le canal de fuite a été modélisé de la même façon que les ouvrages du bief d'amenée, c'est-à-dire, par un choix approprié du "n" de Manning (,031) pour ce genre de structure. Le chenal de la nouvelle île peut raisonnablement être considéré comme semblable au chenal de l'île des Soeurs.

Un autre type de décision mérite une considération attentive, il s'agit du choix des conditions aux limites en hauteur d'eau à l'amont du domaine. Le partage du débit entre les deux bras des rapides de Lachine à l'amont est contrôlé par l'amont et par conséquent indépendant des conditions du bassin La Prairie. Il en résulte cependant des conséquences sur la hauteur d'eau dans le bassin en particulier, à l'amont de celui-ci. Comme des changements de partage du débit doivent être envisagés, c'est par le biais du choix de la hauteur d'eau comme condition aux limites que nous avons agi sur le modèle. Le choix approprié des hauteurs à l'amont implique d'introduire une dénivellation latérale entre les deux entrées du domaine ce qui est raisonnable. Ces modifications maintiennent tout de même le domaine dans un état dans l'ensemble comparable au milieu actuel du point de vue du choix des coefficients de frottement.

4.5.2 Mélange des eaux

Il est difficile de pouvoir affirmer sans contredit possible la valeur prédictive de nos résultats sur le mélange des eaux. Cependant, comme il s'agit de domaines où le mélange est dominé par les processus de transport plutôt que la dispersion proprement dite, la valeur des simulations est particulièrement dépendante des champs de vitesses calculés et des trajectoires d'écoulement qui en découlent.

Dans la mesure où les données hydrodynamiques peuvent être considérées comme fiables, on peut affirmer que les changements du mélange des eaux calculés par notre modèle jouissent d'un degré de fiabilité comparable aux

données actuelles du problème. Dans cet esprit, nous recommandons au lecteur de ne considérer dans son analyse que la valeur relative des modifications calculées par le modèle.

Ainsi, on remarquera en comparant les situations actuelles et futures que la zone des eaux de l'Outaouais est modifiée significativement par les changements d'hydraulicité dans le Lac Saint-Louis. En effet, il est aisé à comprendre qu'une augmentation du débit de l'Outaouais en crue va se répercuter par un élargissement de la zone d'influence de ces eaux dans le lac Saint-Louis.

De même, le bief d'amenée est influencé notablement dans la zone des ouvrages en raison de l'appel de débit vers la rive sud créé par la centrale. Une comparaison des états actuels et futurs est très révélatrice de ce changement. Cependant, cette influence demeure limitée à la proximité des ouvrages.

Dans le bassin La Prairie, il s'avère extrêmement difficile de prévoir l'effet exact des changements proposés. L'élargissement brusque du cône de diffusion (créé par l'appel de la centrale) à l'aval du bief d'amenée va certainement élargir la zone d'influence des eaux de l'Outaouais (diluées en partie) à l'entrée du bassin La Prairie. En l'absence de données précises pouvant nous éclairer sur la répartition des conditions aux limites amont, nos résultats n'ont qu'une valeur faiblement indicative. Cependant, on peut noter que les conditions futures de mélange latéral des eaux resteront relativement semblables à la situation actuelle (voir calibration).

4.6 INVENTAIRE DES MODIFICATIONS AUX CONDITIONS ABIOTIQUES

Le but ultime de notre étude est de fournir les données de base à l'analyse d'impact sur ces divers milieux. La direction Environnement d'Hydro-Québec nous a demandé de cartographier les changements abiotiques du milieu à la lumière de trois critères: biologique, humain et glace. Comme notre mandat se bornait à identifier sur carte les changements à survenir,

aucune analyse ou évaluation ne sera réalisée ici sur la portée et l'étendue de ces changements.

4.6.1 Critère biologique

Le premier critère (biologique) est axé sur les aspects physiques du milieu qui définissent ses caractères particuliers d'habitabilité pour la faune et la flore aquatique. Deux valeurs attirent alors l'attention de l'analyste: la profondeur d'eau totale et la vitesse de l'eau. Le substrat et la qualité de l'eau sont considérés indépendamment. Il s'agissait pour nous de présenter simultanément sur la même image une double gamme de profondeurs et de vitesse. On trouvera au tableau 14 les intervalles de valeurs qu'on nous a demandé de prendre en compte pour le critère biologique dans les divers domaines. Tous les résultats concernant le critère biologique sont présentés dans les diverses annexes graphiques et sont numérotés **.06 à la suite des descripteurs appropriés (ex.: Bassin La Prairie (LPR), état actuel (.A), étiage décennal (.ETI), critère biologique (.06) ce qui donne LPR.A.ETI.06). On pourra se référer à la table des matières pour une description plus complète de ce code de numérotation.

Toutes les planches de résultats comprennent également les superficies en km² des différents domaines couvrant les intersections significatives de conditions de profondeur et de vitesse. Ces planches ont été produites, rappelons-le, avec le logiciel HYGRAF développé à l'Université Laval.

4.6.2 Critère humain

Le critère humain a été appliqué de la même façon que le critère biologique. Les valeurs des intervalles retenus traduisent la praticabilité de certaines activités nautiques (navigation de plaisance, par exemple). Ces intervalles sont présentés au tableau 15. Toutes les planches des annexes graphiques relatives au critère humain portent l'extension **.07.

Tableau 14: Intervalles de valeurs du critère biologique

Lac Saint-Louis et bassin La Prairie:

Profondeur (m)	Vitesse (m/s)
0,0 - 0,5	0,0 - 0,2
0,5 - 1,0	0,2 - 0,3
1,0 - 2,0	0,3 - 0,6
2,0 - 5,0	0,6 - 1,0
5,0 - et plus	1,0 - 2,0 2,0 - et plus

Bief d'amenée:

Profondeur (m)	Vitesse (m/s)
0,0 - 0,8	0,0 - 1,5
0,8 - 1,5	1,5 - 3,0
1,5 - 2,4	3,0 - 6,0
2,4 - et plus	6,0 - et plus

Tableau 15: Intervalles de valeurs du critère humain

Lac Saint-Louis et bassin La Prairie:

Profondeur (m)	Vitesse (m/s)
0,0 - 2,0	0,0 - 1,0
2,0 - 2,5	1,0 - 1,5
2,5 - 3,0	1,5 - 2,0
3,0 - 4,0	2,0 - 3,0
4,0 - 5,0	3,0 - et plus
5,0 - 6,0	
6,0 - et plus	

Bief d'amenée:

Profondeur (m)	Vitesse (m/s)
0,0 - 0,8	0,0 - 1,5
0,8 - 1,5	1,5 - 3,0
1,5 - 2,4	3,0 - 6,0
2,4 - et plus	6,0 - et plus

4.6.3 Critère de glace

Le critère de glace est basé sur les conditions hydrodynamiques discriminant la présence ou l'absence d'un champ de glace dans un cours d'eau. Cette connaissance est d'une grande portée pour la faisabilité et surtout la rentabilité des ouvrages. En effet, la présence d'un champ de glace augmente considérablement le frottement appliqué sur l'écoulement ce qui se traduit par une perte de charge accrue et le maintien de niveaux plus élevés. Cette situation se traduit par une diminution du potentiel hydro-électrique exploitable spécialement en hiver, période de forte demande énergétique dans notre pays. Le critère de glace est basé seulement sur des intervalles de vitesses. Les conditions de température de l'eau sont considérées à part et ailleurs que dans cette étude. Il est nécessaire d'ajouter ici que la présence présumée d'un champs de glace n'a pas été prise en considération dans le choix des paramètres de frottement du modèle et on peut affirmer que ces résultats ne sont pas valables si un champ de glace est présent. Ce serait le cas par exemple des étiages décennaux d'hiver dans le lac Saint-louis ou le bief d'amenée.

Les intervalles de vitesses considérés ont été les mêmes pour les trois domaines, c'est-à-dire, 0,0 - 0,6 m/s, 0,6 - 0,8, 0,8 - 1,0 et enfin 1,0 et plus.

Toutes les planches des annexes graphiques relatives à ce critère portent le numéro d'extension **.04.

5.0 CONCLUSION

Une analyse complète de l'hydrodynamique et du mélange des eaux du fleuve Saint-Laurent dans la région dite "sud-est" de l'Archipel de Montréal a été réalisée en utilisant la méthode des éléments finis et des outils modernes de visualisation par infographie. Les conditions actuelles d'écoulement ont été simulées dans le but de prouver la validité des outils utilisés et aussi pour établir les conditions de référence du milieu. Les modifications au milieu, qu'elles soient physiques ou associées aux règles de gestion ont ensuite fait l'objet d'une seconde "ronde" de modélisation dans le but de fournir aux aménagistes et ingénieurs les données requises pour évaluer la pertinence des changements proposés et leurs conséquences environnementales.

Les conditions d'hydraulicité ayant fait l'objet de nos simulations sont considérées comme typiques de l'ensemble de la gamme des phénomènes hydrologiques des milieux à l'étude. Il s'agit de l'étiage décennal, du débit module et des crues décennale et centennale.

Quelques réserves doivent être formulées sur l'utilisation éventuelle de ces résultats. Les données sur les vitesses sont par définition des valeurs moyennes dans l'espace et dans le temps de l'écoulement. Il ne faudrait pas chercher à interpréter nos résultats comme des valeurs exactes localement. Il faut plutôt y voir des valeurs représentatives d'une zone couvrant approximativement 1/3 de la superficie des éléments adjacents à un noeud. Cette zone représentative varie donc selon la densité du maillage choisi. De même, il faut utiliser avec beaucoup de réserve ces résultats dans les zones frontières du domaine en particulier sur les littoraux fermés. Pour pouvoir utiliser nos résultats numériques dans de telles zones, un maillage beaucoup plus dense serait nécessaire, pour mieux tenir compte des faibles profondeurs et des particularités géométriques qu'on y retrouve.

En ce qui concerne le mélange des eaux, les résultats doivent être interprétés en valeur relative dans l'esprit d'une analyse de sensibilité.

BIBLIOGRAPHIE

1. Brooks, A.N. and Hugues, T.J.R. (1982), "Stream Line Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Confined Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, V. 32, North Holland Pub. Co, pp. 199-259.
2. Carballada, L. (1982), "Projet Archipel - Simulation mathématique bidimensionnelle des courants dans le lac Saint-Louis", Hydro-Québec, service hydraulique, rapport # RSH-43-82-41.
3. Côté, Bertrand (1983), Projet Archipel de Montréal - rapport synthèse des études de mélange des eaux en conditions actuelles. Hydro-Québec, service hydraulique, Rapport 08743-RA-8306.
4. Dhatt, G., Dupuis, P., Leclerc, M. et Soulaïmani, A., "Modélisation des écoulement lents et rapides", pour Hydro-Québec, rapport TAO-Simulations inc. # TAO-85-02.
5. Dhatt, G. et Touzot, G. (1981), "Une présentation de la méthode des éléments finis", Maloine et P.U.L.
6. Löhner, R., Morgan, K., Peraire, J., Zienkiewicz, O.C. (1985), "Recent Developments in FEM-CAD", Institute for Numerical Methods in Engineering, rapport # C/R/513/85, Swansea, U.K.
7. Roche et Ass. (1985), Avant-projet Archipel - Étude d'impact d'environnement, hypothèses de conception et de construction - gel des concepts.
8. Rousseau, Sauvé, Warren (1981, révisé 1985) "Archipel de Montréal - zone sud-est lots 101 et 102 - document #1 et documents de référence" note technique, Pap. PC 80/C1-07.
9. R.S.W. (Rousseau, Sauvé, Warren), (1983). Projet Archipel de Montréal, zone sud-est - études sur modèle réduit - conditions hydrauliques actuelles en eau libre lot d'ingénierie #103, doc #2, note technique, PC-80-C1-07.
10. Rousseau, Sauvé, Warren (1985), Projet Archipel - Étude d'avant-projet - recueil des données de base et critères de conception.
11. Soulaïmani, A. (1983), "Nouveaux aspects de l'application de la méthode des éléments finis en hydrodynamique", Thèse de maitrise, département de génie civil, Université Laval.

12. TAO Simulations (1985a), "Implications technico-environnementales de la configuration 2 du scénario 11 de la variante 18 de l'aménagement hydro-électrique de l'Archipel de Montréal" rapport # TAO-85-01, CRANI-85-02, INRS-Eau-RS-176.
13. Villeneuve et al (1971), Rationalisation du réseau hydrométrique du Québec, INRS-Eau, RS #1, 363 p, 6 ann. pour Environnement Canada.

ANNEXE I

MODIFICATION DU MODÈLE VARIATIONNEL POUR PRENDRE EN COMPTE UNE BATHYMÉTRIE DISCONTINUE

Le choix du degré de l'approximation de la géométrie du domaine et des inconnues du problème est déterminé par l'ordre des dérivations à réaliser au sein du modèle variationnel. La bathymétrie d'un cours d'eau aménagé pouvant être discontinue, il est nécessaire de disposer d'une formulation variationnelle acceptant une approximation de h' (profondeur p/r au plan de référence) elle aussi discontinue. Il suffit alors de faire correspondre la frontière des éléments avec la limite des discontinuités physiques (figure A1.1).

Pour ce faire, la forme variationnelle doit être modifiée au niveau de la fonctionnelle de continuité.

Nous avons:

$$W = \int_A \delta h \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} \right) dA = 0$$

Pour dériver en x ou y les termes Hu et Hv , l'approximation utilisée doit au moins être linéaire. Intégrons cette relation par parties

$$W = - \int_A (\delta h \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + Hu \frac{\partial}{\partial x} (\delta h) + Hv) \frac{\partial}{\partial y} (\delta h) dA + \oint_S \delta h (Hu_N) ds = 0$$

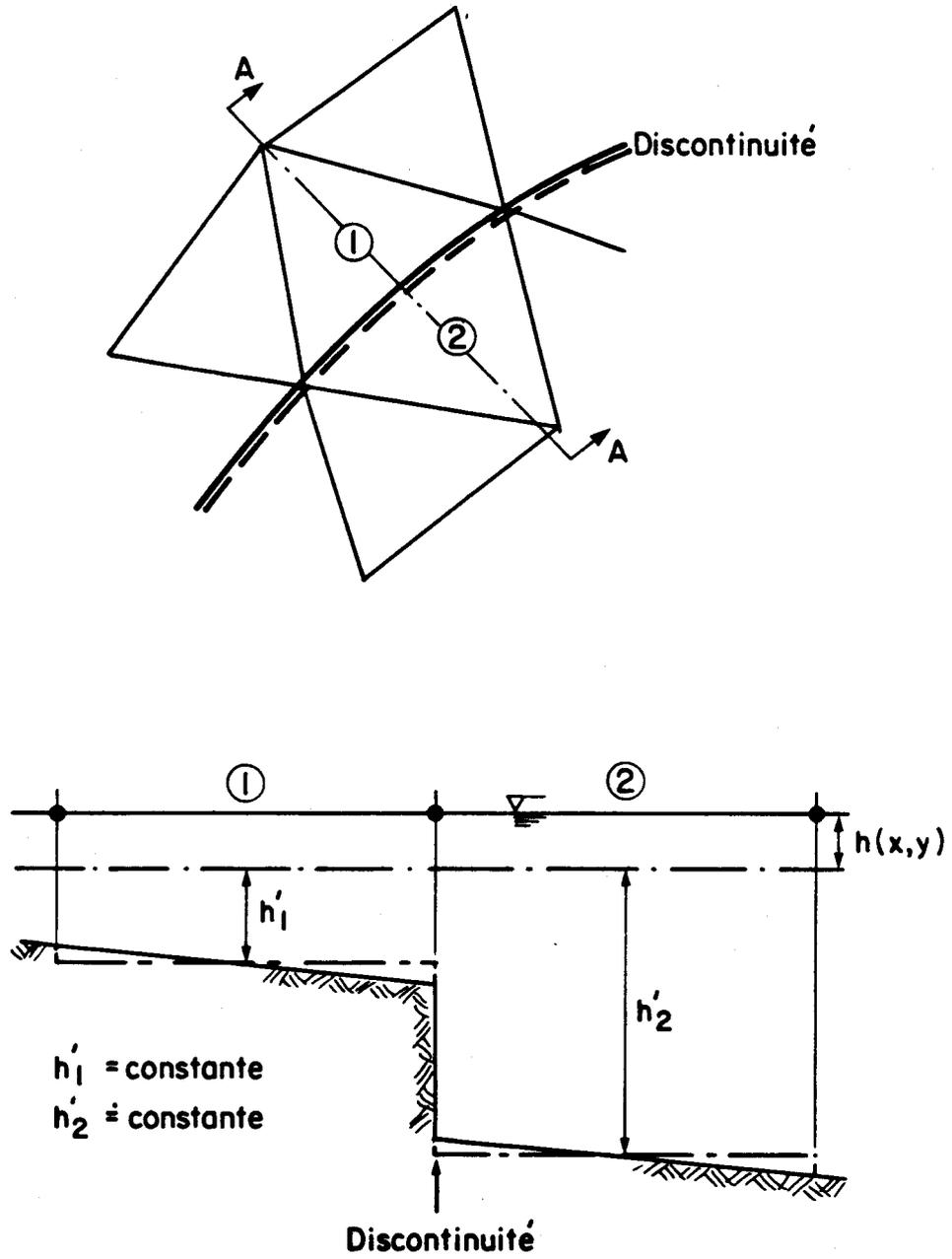


Figure A1.1: Bathymétrie discontinue et approximation de la géométrie constante par élément

où

s : coordonnée locale sur la frontière;

u_N : vitesse normale à s

H : $h = h'$

On peut négliger le terme de contour (sur s) si la hauteur d'eau est imposée (alors, $\delta h = 0$) ou encore si $u_N = 0$ (frontières imperméables).

L'intégrale de surface (sur A) est possible même si l'approximation de H est discontinue aux frontières de l'élément, c'est-à-dire, constante par élément.

ANNEXE II

FORMULATION VARIATIONNELLE DU MODÈLE DE TRANSPORT-DIFFUSION PAR UNE MÉTHODE DE TYPE TAYLOR-GALERKINE

Généralement, pour un problème spatio-temporel, l'application de la méthode des éléments finis dans le domaine spatial précède la discrétisation temporelle. On peut cependant procéder à l'inverse. Nous appliquons d'abord cette approche à un problème purement convectif soit, :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (A2-1)$$

Développons en série de Taylor la fonction concentration au voisinage de t

$$C(t + \Delta t) = C(t) + \Delta t \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_t + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} + \epsilon \quad (A2-2)$$

Nous ne garderons ici que les termes inférieurs au troisième ordre.

L'équation (A2-1) définit un opérateur différentiel tel que :

$$\frac{\partial}{\partial t} = - u \frac{\partial}{\partial x} - v \frac{\partial}{\partial y} \quad (A2-3)$$

et,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) \\
 &= -u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) - v \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) \\
 &= -u \frac{\partial}{\partial x} \left(-u \frac{\partial}{\partial x} - v \frac{\partial}{\partial y} \right) - v \frac{\partial}{\partial y} \left(-u \frac{\partial}{\partial x} - v \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (A2-4)
 \end{aligned}$$

En faisant l'hypothèse que les composantes u et v varient peu par élément, on trouve:

$$\frac{C(t + \Delta t) - C(t)}{\Delta t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\Delta t}{2} \left(u^2 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + 2uv \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + v^2 \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (A2-5)$$

Il est donc clair que l'approximation de la dérivée temporelle par un schéma de type Euler met en évidence des termes du second ordre (équation A2-5) de type diffusif. Ces termes seront considérés lorsque la convection jouera un rôle important, puisqu'il s'additionnent à ceux, représentant la dispersion, déjà contenus dans le modèle de base. L'équation finale s'écrira donc:

$$\dot{C} = -u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} \Big|_t + K_j \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} \Big|_t + \frac{\Delta t}{2} (u_j u_k \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_k}) \quad (A2-6)$$

$j = 1, 2$; $k = 1, 2$ dans la même équation

avec

$$\dot{C} = \frac{C_{t+\Delta t} - C_t}{\Delta t}$$

La forme intrégrale est alors obtenue par l'expression du résidu pondéré par la méthode de Galerkin. Cette forme est partiellement intégrée par partie, c'est-à-dire seulement pour les termes du second ordre, de façon à réduire le degré de la base polynomiale de l'approximation de C et mettre en évidence des termes de contour. Ceux-ci, en raison des conditions de flux nul et des conditions cinématiques de l'écoulement le long du contour naturel, disparaissent.

La forme intégrale du modèle s'écrit

$$\int_A [\delta C (\dot{C} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y}) + A_1 \frac{\partial(\delta C)}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + A_2 \frac{\partial(\delta C)}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} + A_3 (\frac{\partial(\delta C)}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial(\delta C)}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial x})] dA \quad (A2-7)$$

avec

$$A_1 = \frac{\Delta t}{2} u^2 + K_x \quad ; \quad A_2 = \frac{\Delta t}{2} v^2 + K_y \quad ; \quad A_3 = \frac{\Delta t}{2} uv$$

où δC : première variation de C.

La présence dans ce modèle de termes diffusifs fonction des composantes u et v équivaut à un décalage dans le sens de l'écoulement du schéma numérique. Ceci peut aussi être assimilé à la discontinuité des fonctions de pondération de façon à orienter le schéma numérique (Brook et al, 1982).

ANNEXE III

CALCUL DU DÉBIT - MÉTHODE DU "TRAPÈZE"
(EXTRAIT DE TAO SIMULATIONS INC., 1985A)

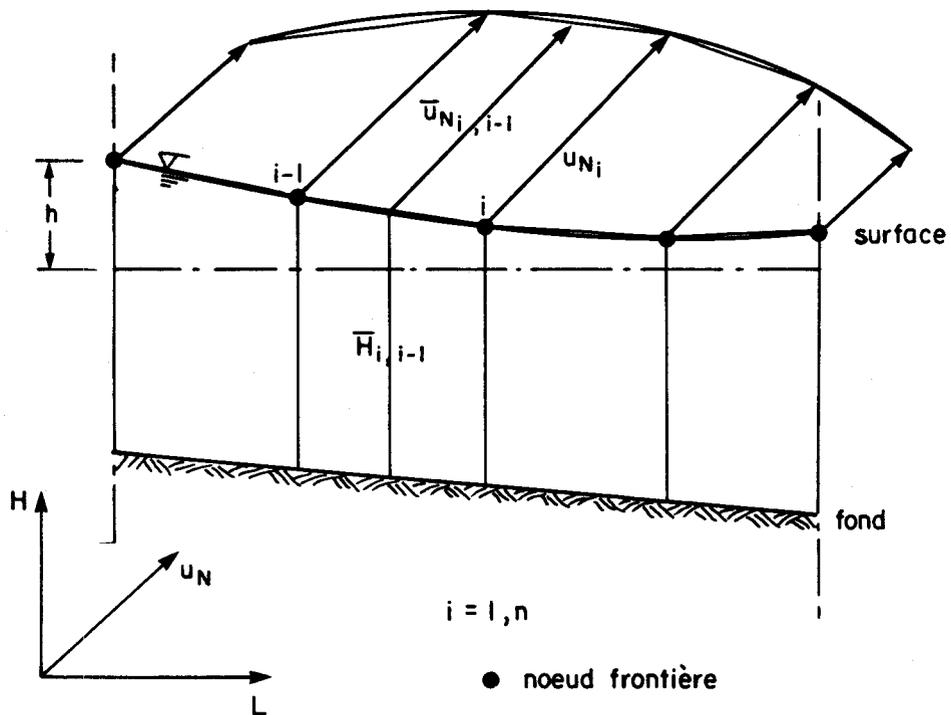


Figure A3.1: Calcul du débit par la méthode du "trapèze"

$$\begin{aligned} A_{i,i-1} &= (H_{i-1}) + (H_i) \times \frac{L_{i-1,i}}{2} \\ &= (\overline{H_{i-1,i}} \times L_{i-1,i} \end{aligned}$$

$$Q_{i-1,i} = \overline{u_{N_{i-1,i}}} \times A_{i-1,i}$$

$$Q = \sum_2^n u_{N_{i-1,i}} = A_{i-1,i}$$

$$\overline{u_{N_{i-1,i}}} = \frac{(u_{N_{i-1}} + u_{N_i})}{2}$$

où u_{N_i} : est la vitesse normale à la section i

$L_{i-1,i}$: la largeur d'une section $i-1 \rightarrow i$

$A_{i-1,i}$: l'aire verticale d'une section $i-1 \rightarrow i$

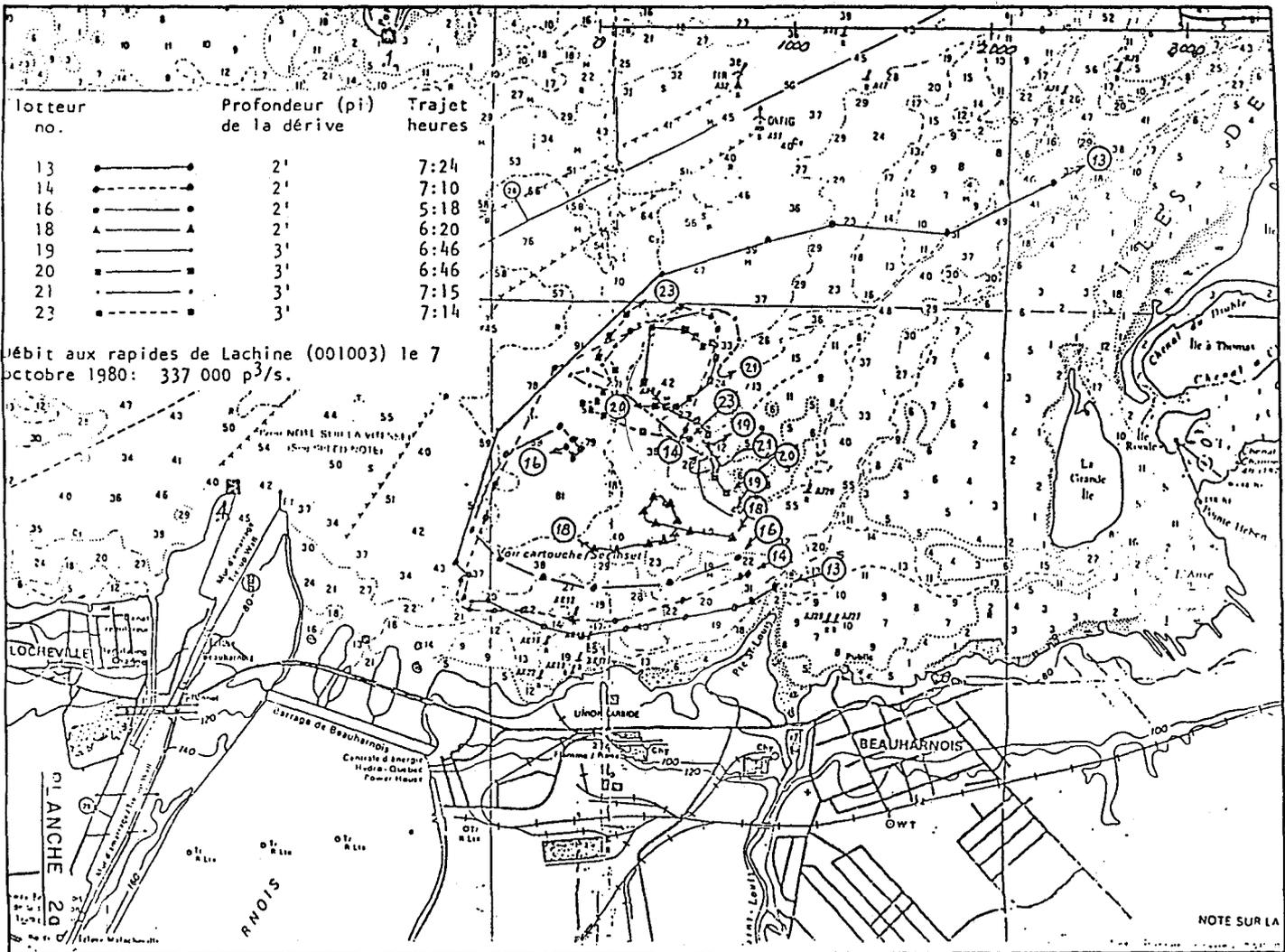
i : un noeud de maillage

$\overline{H}_{i-1,i}$: profondeur totale moyenne d'une section $i-1 \rightarrow i$

ANNEXE IV

QUELQUES CONDITIONS DE RÉFÉRENCE POUR LA CALIBRATION
DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE DANS LE LAC SAINT-LOUIS

Figure A4.1a: Illustration du tourbillillon observé le 7 octobre 1980 à droite du courant de sortie de la centrale Beauharnois - débit d'environ 11,000 m³/s (cité par Carballada, 1982)



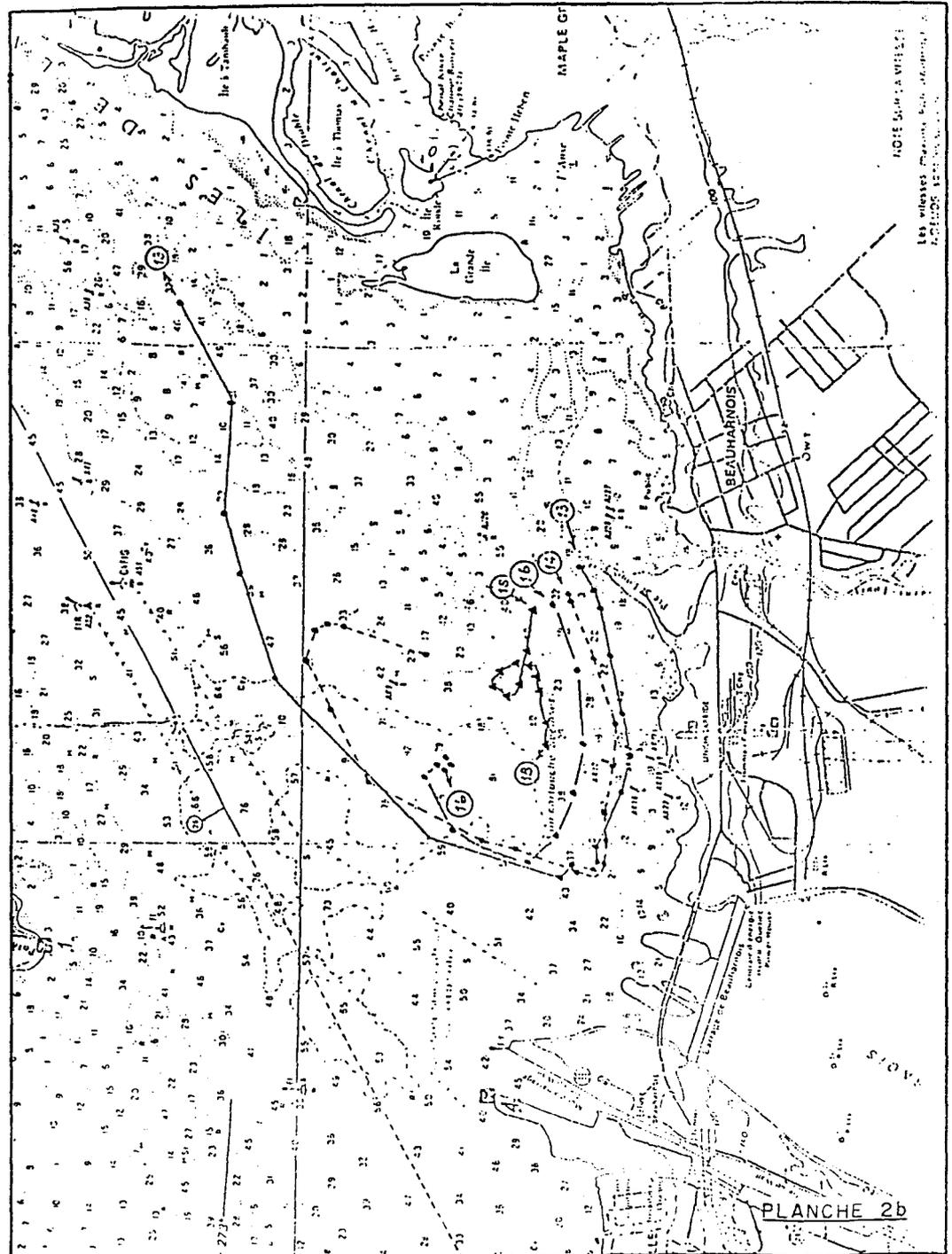


Figure A4.1b: Illustration du tourbillon observé le 7 octobre 1980 à droite du courant de sortie de la centrale Beauharnois - débit d'environ 11,000 m³/s (cité par Carballada, 1982)

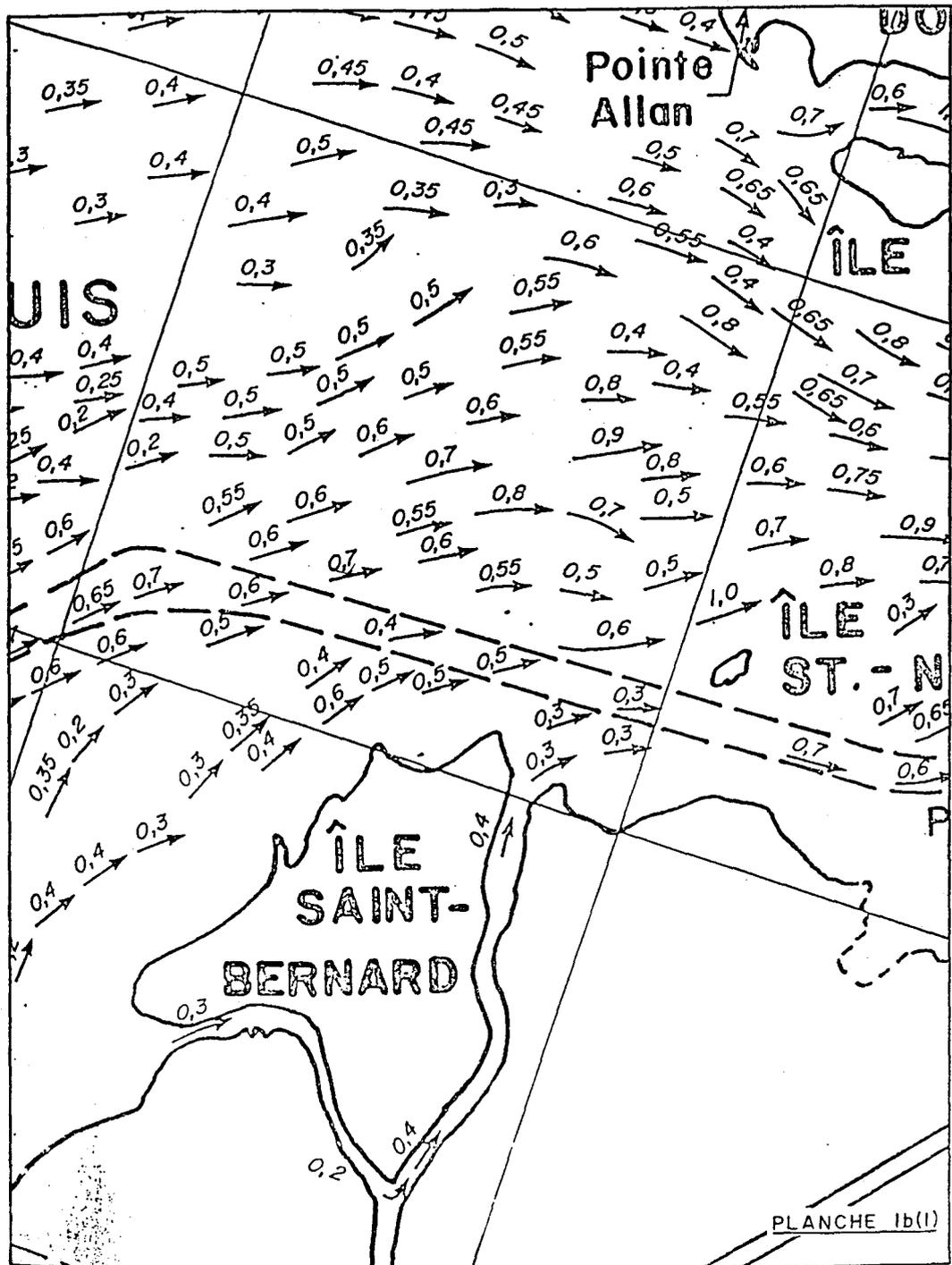


Figure A4.2: Illustration du champ de vitesse de surface obtenu sur modèle réduit dans le bief d'aval du lac Saint-Louis en face de l'île Saint-Bernard - débit module (cité par Carballada, 1982)

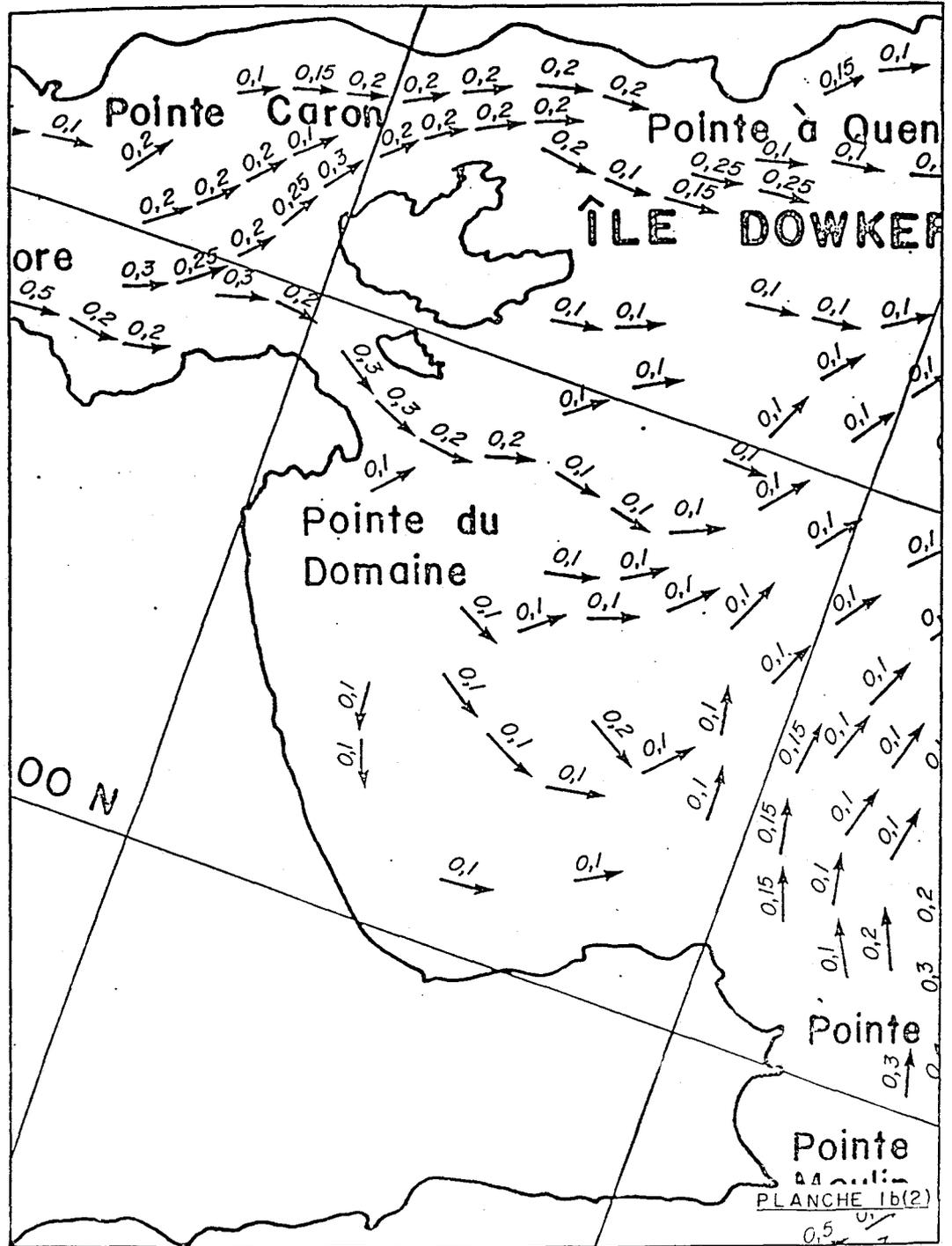


Figure A4.3: Illustration du champ de vitesse de surface obtenu sur modèle réduit dans le bief du chenal Ste-Anne - débit module (cité par Carballada, 1982)