

**Record Number:****Author, Monographic:** Leclerc, M.//Bellemare, J. F.//Robert, J. L.//Dhatt, G.**Author Role:****Title, Monographic:** Impacts potentiels sur le poulamon atlantique à la traversée du fleuve Saint-Laurent de la ligne Radisson Nicolet des cantons: modélisation du milieu physique**Translated Title:****Reprint Status:****Edition:****Author, Subsidiary:****Author Role:****Place of Publication:** Québec**Publisher Name:** INRS-Eau**Date of Publication:** 1986**Original Publication Date:****Volume Identification:****Extent of Work:** vii, 62**Packaging Method:** pages**Series Editor:****Series Editor Role:****Series Title:** INRS-Eau, Rapport de recherche**Series Volume ID:** 210 v2**Location/URL:****ISBN:** 2-89146-491-5**Notes:** Rapport annuel 1987-1988**Abstract:** Rapport rédigé pour Hydro-Québec, Direction environnement et distribué par TAO Simulations, no TAO HYD-86-02  
ISBN double avec le R000488  
45.00\$**Call Number:** R000210 v2**Keywords:** rapport/ ok/ dl

1987  
V.2

ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES

IMPACTS POTENTIELS SUR  
LE POULAMON ATLANTIQUE  
À LA TRAVERSÉE DU FLEUVE  
SAINT-LAURENT DE LA LIGNE  
RADISSON/NICOLET/DES CANTONS:  
MODÉLISATION DU MILIEU PHYSIQUE

RÉSUMÉ DE LA MÉTHODOLOGIE  
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

TAO Simulations Inc.  
La Direction Environnement  
Hydro-Québec

CENTRE DE DOCUMENTATION  
DIRECTION ENVIRONNEMENT  
HYDRO-QUÉBEC  
800 EST, BOUL. DE MAISONNEUVE  
1.7e ÉTAGE - TOUR SEBJ  
MONTRÉAL, QC  
H2L 4M8

RÉSUMÉ DU RAPPORT # TAO/HYD-86-02  
# INRS-EAU/Rs # 210  
# CRANI 86-04

## LISTE DES PARTICIPANTS

Michel Leclerc, D.ing.	Chargé de projet
Jean-François Bellemare, M.Sc.A	Modélisation hydrodynamique
Jean-Loup Robert, Ph.D. (professeur à l'Université Laval)	Modélisation du mélange des eaux
Richard Blanchet, B.Sc.A	Modélisation du mélange et post- traitement
Guy Gendron, M.Sc.A	Modélisation hydrodynamique
Guy Dumas, M.Sc.A	Modélisation hydrodynamique
Gouri Dhatt, Ph.D.	Conseiller scientifique et prés. de TAO Simulations
Yves Matte, M.Sc.A	Pré-traitement
Pierre Dupuis, M.Sc.A	Développement infographique
Louis Desjardins, M.Sc.A	Développement en CAO
Jean-Pierre Troude, Ph.D. (Consultants St-Laurent)	Opérations de terrain
Pierre Bertrand, M.Sc.	Opérations de terrain
Clément Dubé, Ph.D. (INRS-Eau)	Traitement d'images
Jean-Pierre Fortin, Ph.D. (Professeur à l'INRS-Eau)	Traitement d'images
François Parrot, B.Sc.A.	Post-traitement
Sophie Leclerc	Graphisme
Hélène Arteau	Secrétariat

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
Liste des participants .....	i
Table des matières .....	ii
Liste des figures .....	iii
Liste des tableau .....	iv
Préambule .....	v
1. Introduction .....	1
2. Étapes de l'étude .....	3
Le modèle MEFLU-2.0 .....	3
3. Calibration du modèle .....	5
Modèle géométrique .....	5
Événement témoin pour la calibration de MEFLU-2.0 .....	6
Valeur des paramètres .....	7
Comparaison des résultats du modèle aux mesures .....	7
Conclusion .....	10
4. Analyse de sensibilité: choix d'événements de référence .....	12
5. Extrapolation du modèle aux conditions futures .....	15
6. Description des résultats - analyse comparative .....	18
Changements dans l'espace .....	18
Changement des courants en intensité et fréquence .....	28
Comparaison avec les conditions actuelles à la pointe de Grondines ..	39
7. Conclusions et recommandations .....	49
Conclusions relatives à la démarche .....	49
Conclusions générales relatives au projet proposé .....	50
Conclusions relatives au comportement du poulamon atlantique .....	52
Recommandation .....	54

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1	Délimitation dans le modèle des zones sédimentologiques ..... 6
Figure 3.2	Crue moyenne d'automne - marégrammes observés et calculés à Lotbinière ..... 8
Figure 3.3	Crue moyenne d'automne - débit simulé en conditions actuelles en divers endroits du modèle ..... 8
Figure 3.4	Comparaison des vitesses mesurées et calculées par le modèle - État de référence pour la calibration - Temps relatif du modèle (a) pleine mer inférieure (b) et (c) fin du montant de la pleine mer supérieure ..... 9
Figure 3.5	Zone moyenne de mélange de la rivière Sainte-Anne dans le fleuve Saint-Laurent - marée baissante → basse mer inférieure du 25 octobre 1986 ..... 10
Figure 3.6	Image dans l'infra-rouge thermique des eaux du fleuve Saint-Laurent dans la région de Grondines (prise lors d'un survol le 25 octobre 1986 à marée baissante) ..... 11
Figure 4.1	Minimum et maximum annuels du débit net du Saint-Laurent à l'amont de la Sainte-Anne entre le 15 novembre et le 15 janvier ..... 13
Figure 4.2	Marégrammes observés ou interpolés dans le fleuve Saint- Laurent entre Portneuf et Batiscan (23 novembre 1976) - module d'automne ..... 14
Figure 5.1	Description technique du projet - axe Bois-des-Hurons ..... 16

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 5.2    Discrétisation du milieu à l'étude (771 éléments T-6) pour l'étude du scénario Bois-des-Hurons, vue détaillée de l'axe Bois-des-Hurons .....	17
Figure 6.1    Module de vitesse - Bois-des-Hurons actuel - débit module d'automne (Planche Hur.A.Aut.Mod. 2.4 de l'annexe infographique No 1) .....	20
Figure 6.2    Fleuve Saint-Laurent de Lotbinière à Sainte-Anne-de-la-Pérade - Hydrodynamique, vecteurs-courants simulés 11h30 après la pleine mer inférieure à Grondines .....	22
Figure 6.3    Courants mesurés dans le chenal de navigation à 3 mètres sous la surface en marée moyenne et en marée de vive-eau. (Tiré des Instructions Nautiques, Golfe et fleuve Saint-Laurent ...	23
Figure 6.4    Taux de dilution des eaux de la Rivière Sainte-Anne dans le fleuve Saint-Laurent - Bois-des-Hurons actuel - débit module d'automne (Planche Hur.A.Aut.Mod. 3.4 de l'annexe infographique No 1) .....	24
Figure 6.5    Taux de dilution des eaux de la Rivière Sainte-Anne dans le fleuve Saint-Laurent - Bois-des-Hurons futur - débit module d'automne (Planche Hur.F.Aut.Mod. 3.4 de l'annexe infographique No 2) .....	26
Figure 6.6    Module de vitesse - Bois-des-Hurons futur - débit module d'automne (Planche Hur.F.Aut.Mod. 2.4 de l'annexe infographique No 2) .....	27

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 6.7 Plan de localisation des noeuds du modèle ayant fait l'objet d'une analyse temporelle .....	29
Figure 6.8 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - étiage moyen d'automne .....	31
Figure 6.9 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - module d'automne - a: actuel; b: futur .....	32
Figure 6.10 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - crue moyenne d'automne - a: actuel; b: futur .....	33
Figure 6.11 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - crue moyenne de printemps - a: actuel; b: futur .....	34
Figure 6.12 Section transversale franchissable en fonction de la durée - critère 0,3 m/s - Pointe de la Jetée Nord de l'axe Bois-des-Hurons .....	40
Figure 6.13 Intersections de conditions de vitesse et de profondeur - critère poulamon - Bois-des-Hurons actuel - crue moyenne d'automne (Planche Hur.A.Aut.Crue 4.2 de l'annexe infographique No 1) .....	41
Figure 6.14 Plan de localisation des noeuds du modèle à la pointe de Grondines .....	42
Figure 6.15 Conditions de vitesse à la Pointe de Grondines - a: étiage moyen d'automne; b: module d'automne .....	43
Figure 6.16 Conditions de vitesse à la Pointe de Grondines - a: crue moyenne d'automne; b: crue moyenne de printemps .....	44
Figure 6.19 Section de passage en fonction du temps - critère 0,3 m/s - Pointe de Grondines .....	46

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Choix des coefficients de frottement dans le modèle .....	7
Tableau 6.1 Comparaison des conditions natatoires favorables ( $< 0,3$ m/s) aux pointes de Grondines et de la jetée nord ...	48

## PRÉAMBULE

Cette étude réalisée sous la gouverne de TAO Simulations, doit en partie sa réussite à une riche collaboration interinstitutionnelle qui s'est établie entre l'Institut national de la recherche scientifique - Eau, le CRANI et le département de Génie civil de l'Université Laval et la firme Consultants Saint-Laurent. Chacun a fourni une participation appréciable qu'il s'agisse de l'accès aux équipements et logiciels informatiques, de la réalisation de travaux spécialisés, du développement de la recherche ou de la formation du personnel. TAO Simulations tenait, en guise de préambule, à souligner cet esprit de collaboration et à remercier les divers intervenants. Nos remerciements vont également à la direction Environnement d'Hydro-Québec, en particulier, MM. Gaétan Guertin, Serge Trussart et Jean-Claude Tessier pour la confiance qu'il nous ont témoignée et l'occasion ainsi fournie de démontrer notre expertise en modélisation numérique.

1. INTRODUCTION

Le projet de traversée du fleuve Saint-Laurent de la ligne Radisson/Nicolet/Des Cantons à la hauteur de Bois des Hurons dans la région de Lotbinière est susceptible d'entraîner temporairement - durant la construction - des changements locaux significatifs dans l'hydrodynamique du fleuve. La Direction Environnement d'Hydro-Québec, soucieuse de protéger les habitats fauniques et les voies migratoires, en particulier celle du poulamon atlantique, a mandaté TAO Simulations pour analyser ces changements à l'aide de méthodes numériques reconnues. Le modèle aux éléments finis MEFLU-2.0 conjugué avec une campagne spéciale de mesures sur le terrain, des survols de télédétection et les méthodes infographiques les plus poussées ont été les outils privilégiés pour cette étude.

Le milieu à l'étude est formé par le tronçon du fleuve Saint-Laurent situé entre l'amont de la rivière Sainte-Anne et Lotbinière. Il s'agit d'un milieu principalement fluvial mais fortement influencé par la propagation de la marée. Celle-ci peut même en certaines circonstances, provoquer un renversement du courant jusqu'à l'amont de la zone étudiée. Il s'ensuit alors une circulation relativement complexe. De plus, à marée basse, un découverture de larges portions des estrans est observable.

La bathymétrie est caractérisée par trois types de structures: le chenal principal d'écoulement qui sert de chenal de navigation, la zone de battures ou d'estrans, et une zone mixte de topographie très accidentée.

L'action puissante du fleuve sur la dynamique des sédiments (transport, glacial, etc.) donne à son lit un aspect très varié comprenant des matériaux fins ou grossiers, des cailloux, des blocs glaciels et même des ceintures de blocs erratiques longeant le chenal principal.

L'implantation d'ouvrages temporaires (digues, jetées) sur les estrans du fleuve à la hauteur du Bois-des-Hurons, est susceptible d'y produire

des modifications hydrodynamiques locales appréciables. Il s'agit surtout de la déviation du courant à marée haute provoquée par l'entrave et l'accélération des vitesses à l'extrémité des ouvrages. Les estrans du fleuve Saint-Laurent sont des zones importantes du point de vue faunique; dans cette étude, la problématique du fleuve est posée en fonction des habitudes migratoires du poulamon atlantique. Ce poisson utilise une stratégie de dépense minimale d'énergie pour atteindre son lieu de fraie principal, qui est l'estuaire de la rivière Sainte-Anne. Ce comportement l'incite alors à profiter des marées montantes ou emprunter des corridors de moindre vitesse à marée baissante. La détection olfactive ou autre des eaux de la rivière Sainte-Anne, même à faible pourcentage, dans le choix de la route migratoire ne peut être considérée qu'à titre d'hypothèse au stade actuel des connaissances sur le poulamon atlantique.

L'objectif principal de cette étude est de fournir au planificateur les éléments d'analyse pertinents obtenus par modélisation bidimensionnelle des écoulements. Les objectifs spécifiques qui découlent de cet énoncé sont:

- proposer des conditions de simulation (marée, débit du fleuve) représentatives du milieu étudié, en particulier dans les périodes du frai (15 novembre au 15 janvier) et d'avalaison (15 avril au 31 mai) du poulamon atlantique;
- déterminer le comportement hydrodynamique du fleuve dans le tronçon cible en présence et en l'absence des ouvrages projetés;
- déterminer la zone de propagation des eaux de la rivière Sainte-Anne dans le fleuve;
- identifier dans la bibliographie les informations pertinentes de même nature;

- mettre en évidence, par comparaison, les changements du milieu et identifier s'il y a lieu les risques éventuels pour la migration du poulamon atlantique.

## 2. ÉTAPES DE L'ÉTUDE

L'étude comprend les étapes suivantes:

- le choix d'un modèle (MEFLU-2.0);
- sa calibration sur un état de référence actuel documenté par des mesures;
- le choix de conditions de débits et de marée variées et représentatives pour extrapoler le modèle (états de référence);
- simulation des états de référence;
- adaptation du modèle aux conditions  futures  (présence de jetées);
- simulation des états de références;
- analyse et intégration des résultats;
- comparaison des résultats dans l'optique du poulamon atlantique.

### Le modèle MEFLU-2.0

Deux caractéristiques du milieu à l'étude sont fondamentales pour la modélisation: les effets dynamiques produits par la marée et la mobilité de la frontière de l'écoulement (attribuable également à la marée) associée avec le découverture et le recouvrement cyclique des estrans.

La première caractéristique nécessite la mise en oeuvre d'un modèle non-stationnaire (variant dans le temps), souple et polyvalent et dont la robustesse n'est pas mise en question par la complexité des écoulements à résoudre.

Quoique des variations de vitesse ou de qualité de l'eau puissent être observées dans la verticale, il est scientifiquement admis qu'un modèle bidimensionnel (intégré verticalement) reflète très bien la structure générale des écoulements d'un tel milieu. Cependant, le découvrant graduel des estrans à marée baissante implique nécessairement l'usage d'un modèle de type couvrant - découvrant dont MEFLU-2.0 représente un rare exemplaire disponible.

A la base de MEFLU-2.0, on rencontre un ensemble d'équations aux dérivées partielles traduisant mathématiquement des principes de conservation. Nous avons deux équations de conservation de la quantité de mouvement (équations de Saint-Venant), une équation de conservation de la masse d'eau (continuité) et une équation de conservation du contenu en solution (transport-diffusion).

Ces équations sont originellement disponibles dans un repère tridimensionnel. Dans leur version actuelle, la dimension verticale est simplifiée afin d'obtenir un modèle bidimensionnel.

Les 3 premières constituent le modèle hydrodynamique donnant les composantes du vecteur courant et la hauteur d'eau. La quatrième équation résolue indépendamment nous donne le mélange d'eaux de diverses provenances.

Ces équations ne peuvent être résolues telles quelles étant donné la complexité de leur formulation et du milieu où elles sont appliquées. Une discrétisation, c'est-à-dire, une résolution numérique des équations sur de petites unités homogènes (des triangles à 6 noeuds pour MEFLU-2.0) du milieu est nécessaire. La méthode dite des éléments finis est devenue un outil de plus en plus répandu pour la simulation

bidimensionnelle des écoulements dans les rivières, les fleuves et les estuaires. En plus de permettre la satisfaction des principes de conservation simultanément sur l'ensemble d'une région, cette méthode a la propriété particulière de permettre un ajustement de la densité d'information recherchée, par exemple, autour de structures ou d'ouvrages en plus d'épouser étroitement les formes du milieu.

Pour de plus amples détails sur ce modèle, nous invitons le lecteur à consulter l'article de Leclerc et al. (1987) dans la Revue internationale des Sciences de l'Eau (numéro de juin).

### 3. CALIBRATION DU MODÈLE

La calibration consiste à ajuster les différents paramètres du modèle afin d'obtenir les simulations les plus représentatives d'un événement témoin documenté par des mesures. Dans le cas présent, les écoulements du 25 octobre 1986 ont servi à cette fin. Le modèle MEFLU-2.0 est presque entièrement déterministe et n'utilise que trois paramètres ajustables: le frottement du fond, la viscosité turbulente et le coefficient de dispersion.

Cette démarche est de type itératif; on ajuste les valeurs des paramètres jusqu'à ce que les quantités calculées (débit, niveau, concentration) se rapprochent le plus près possible des valeurs mesurées "in situ". Cette étape est importante car elle influence directement la qualité des simulations ultérieures. La calibration est complétée par une "validation" qui permet de vérifier la valeur du modèle sur des ensembles distincts de données sans intervention nouvelle sur la valeur des paramètres.

#### Modèle géométrique

La figure 3.1 montre le résultat de la discrétisation du milieu par éléments finis (modèle géométrique). On y compte 487 éléments triangulaires disposés de sorte de reproduire le plus fidèlement possible la bathymétrie et également épargner du temps de calcul. On y remarque

également une délimitation de zones homogènes du point de vue des matériaux du lit. Ces zones correspondent à des paramètres de frottement spécifiques.

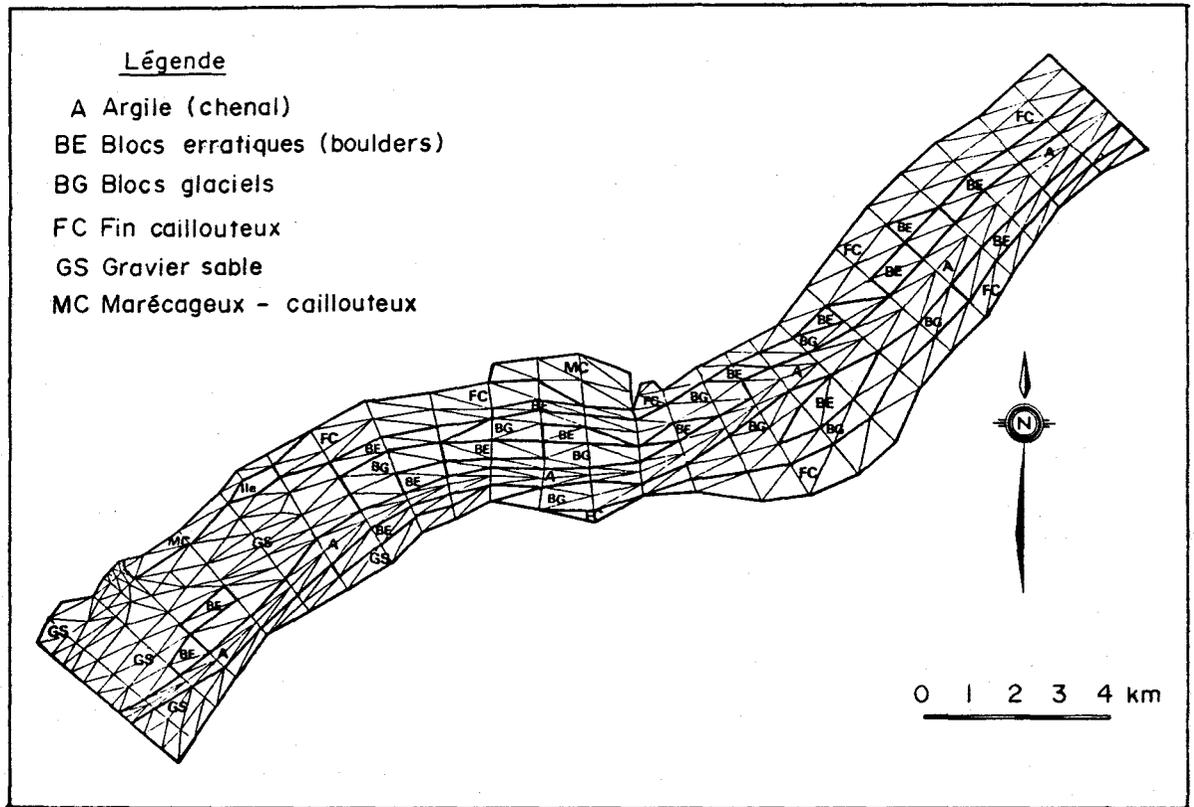


Figure 3.1: Délimitation dans le modèle des zones sédimentologiques

### Événement témoin pour la calibration de MEFLU-2.0

La journée du 25 octobre 1986 a servi d'événement-témoin pour la calibration. L'équipe de travail des "Consultants Saint-Laurent" a réalisé alors des mesures de courants et de conductivité. Le niveau de la marée a été mesuré à l'aide de deux marégraphes enregistreurs implantés près du chenal à Lotbinière et Cap Lévrard. Les mesures de trois marégraphes permanents de Pêches et Océans Canada ont aussi été utilisées. Le groupe de télédétection et de traitement d'images de l'INRS-Eau a procédé à une campagne de survols en vue de positionner le "panache" de la rivière Sainte-Anne. Notons que cette journée était caractérisée par de faibles vents du sud-ouest et un ciel d'une clarté exception-

nelle. Ce dernier facteur a d'ailleurs permis l'obtention d'images de très grande qualité.

#### Valeur des paramètres

Le principal paramètre utilisé est le coefficient de frottement (n de Manning). Aux classes de substrat identifiées à la figure 3.1 correspondent les valeurs données au tableau 3.1.

Tableau 3.1: Choix des coefficients de frottement dans le modèle

Classes de sédiment	"n" de Manning
- Blocs erratiques (Boulder)	0,043
- Blocs glaciels (Drop stones)	0,038
- Marécage	0,038
- Cailloux	0,033
- Sable et gravier	0,028
- Argile et autre (chenal)	0,016

#### Comparaison des résultats du modèle aux mesures

4 ensembles de données ont été utilisés aux fins de calibration et de validation: le niveau de la marée, le débit résiduel du fleuve, les vitesses de courant et le mélange des eaux de la rivière Sainte-Anne. Les vérifications effectuées ont été nombreuses et seuls quelques exemples significatifs pour la calibration seront montrés ici.

La figure 3.2 montre une comparaison des niveaux calculés et observés à Lotbinière. La figure 3.3 illustre l'hydrogramme numérique obtenu par le modèle pour un débit-cible résiduel estimé à 13500 m<sup>3</sup>/s. La figure 3.4 permet de comparer des courants calculés par le modèle à la basse mer supérieure (a) et à la fin du montant de la pleine mer supérieure (b) et (c).

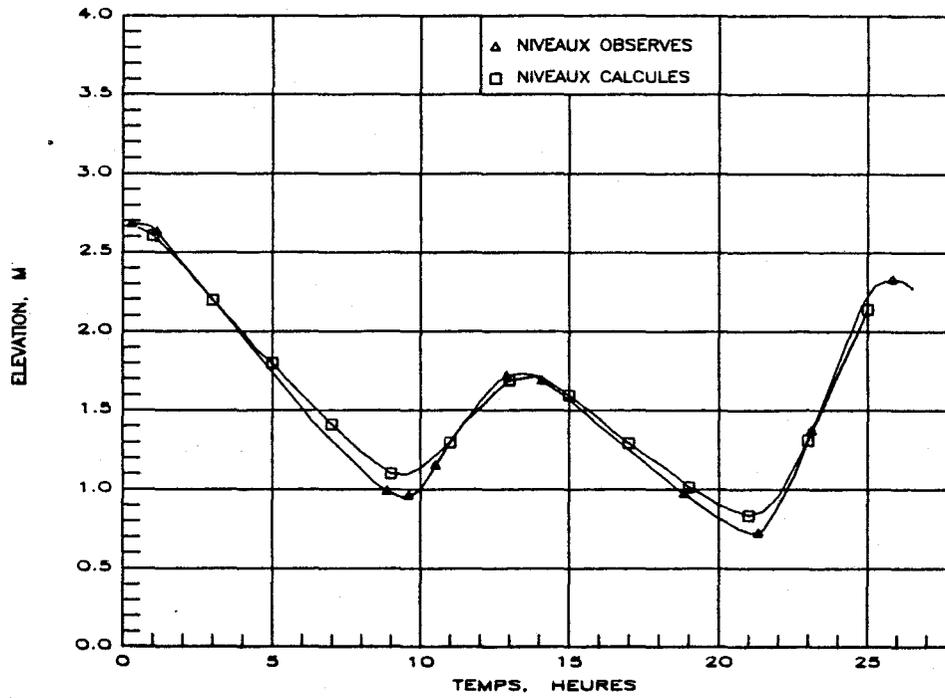


Figure 3.2: Crue moyenne d'automne - marégrammes observés et calculés à Lotbinière (c)

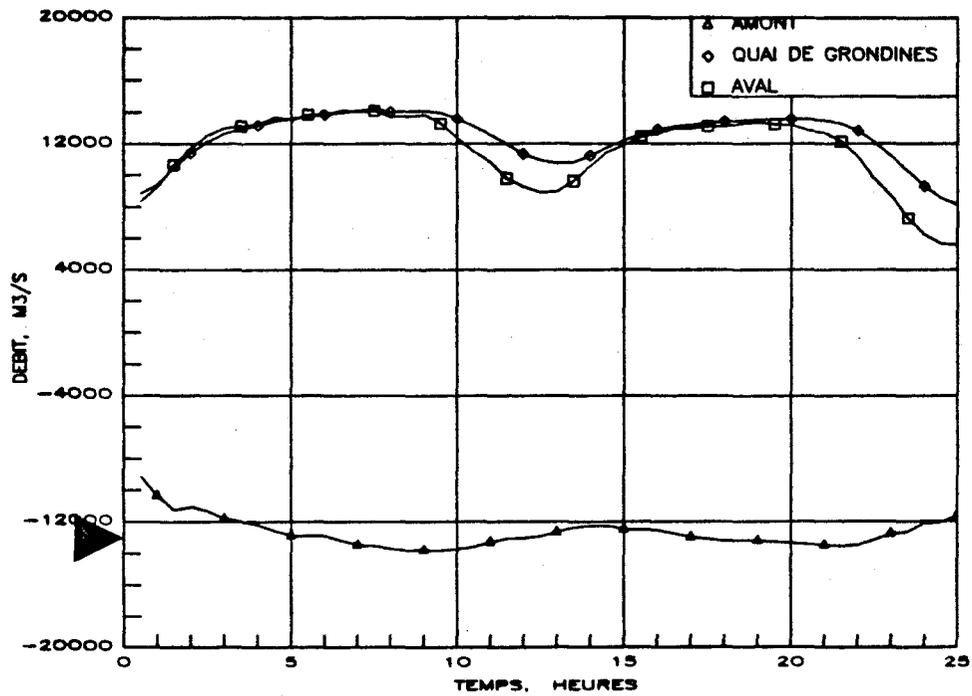


Figure 3.3: Crue moyenne d'automne - débit simulé en conditions actuelles en divers endroits du modèle

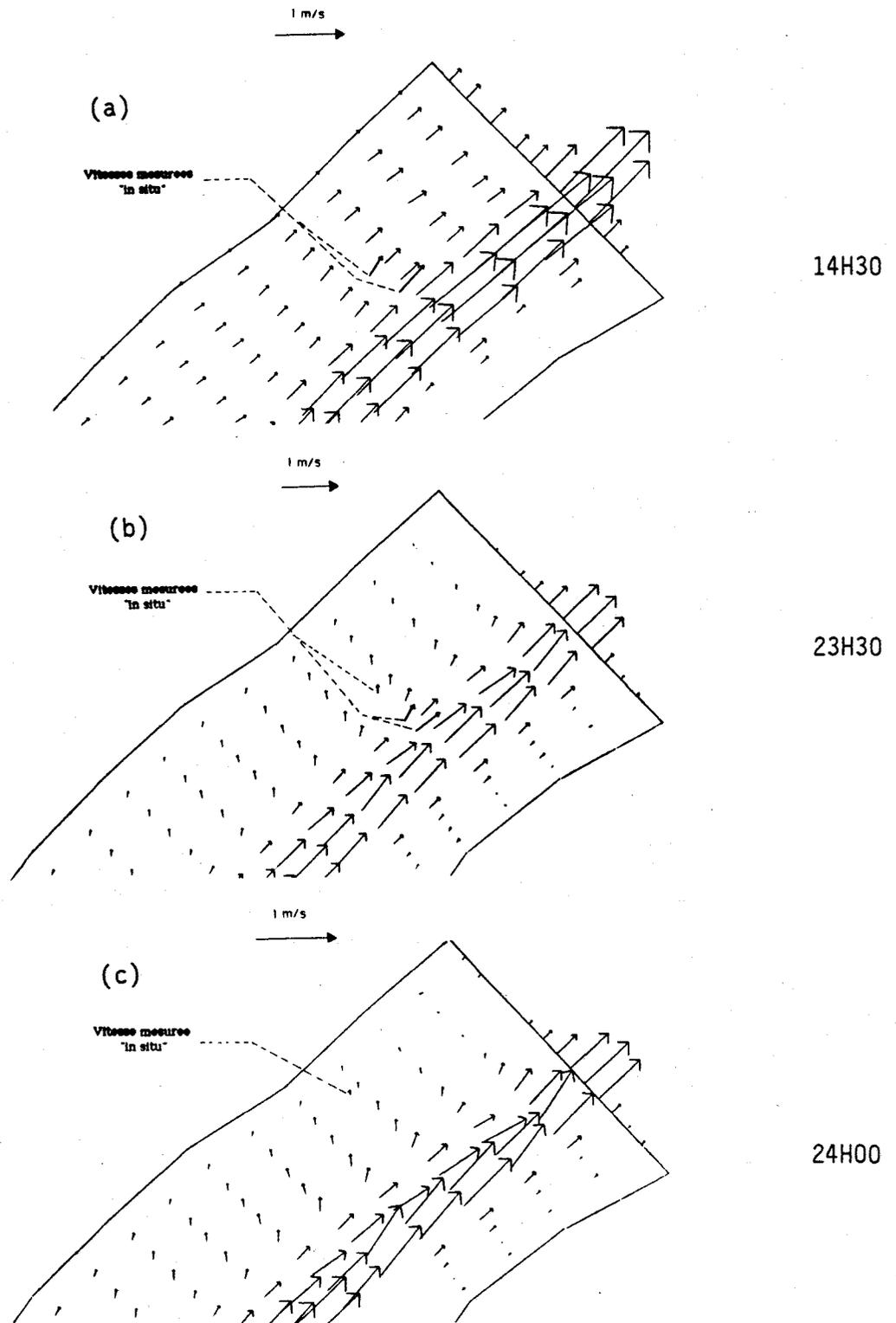


Figure 3.4: Comparaison des vitesses mesurées et calculées par le modèle -  
État de référence pour la calibration - Temps relatif du modèle -  
(a) pleine mer inférieure  
(b) et (c) fin du montant de la pleine mer supérieure

Enfin, la figure 3.5 montre les positions moyennes respectives du panache de la rivière Sainte-Anne dans le modèle et tel que révélé par les survols de télédétection (figure 3.6) à marée baissante.

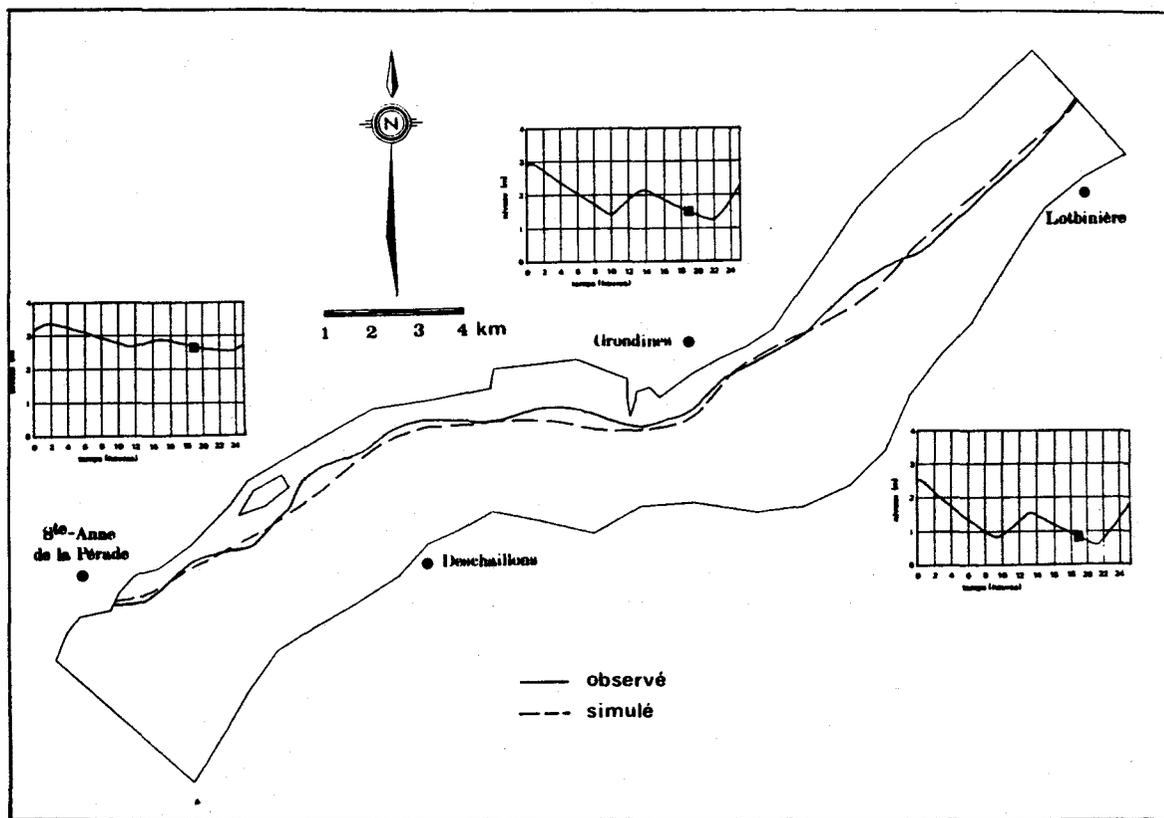


Figure 3.5: Zone moyenne de mélange de la rivière Sainte-Anne dans le fleuve Saint-Laurent - marée baissante → basse mer inférieure du 25 octobre 1986.

### Conclusion

La calibration du modèle a permis d'ajuster la valeur des paramètres et ainsi de reproduire adéquatement les données disponibles du 25 octobre 1986. La validation sur les autres états de référence (décrits à la section suivante) a permis de confirmer la valeur du modèle pour un ensemble varié de conditions d'écoulement allant des étiages d'automne aux crues de printemps.

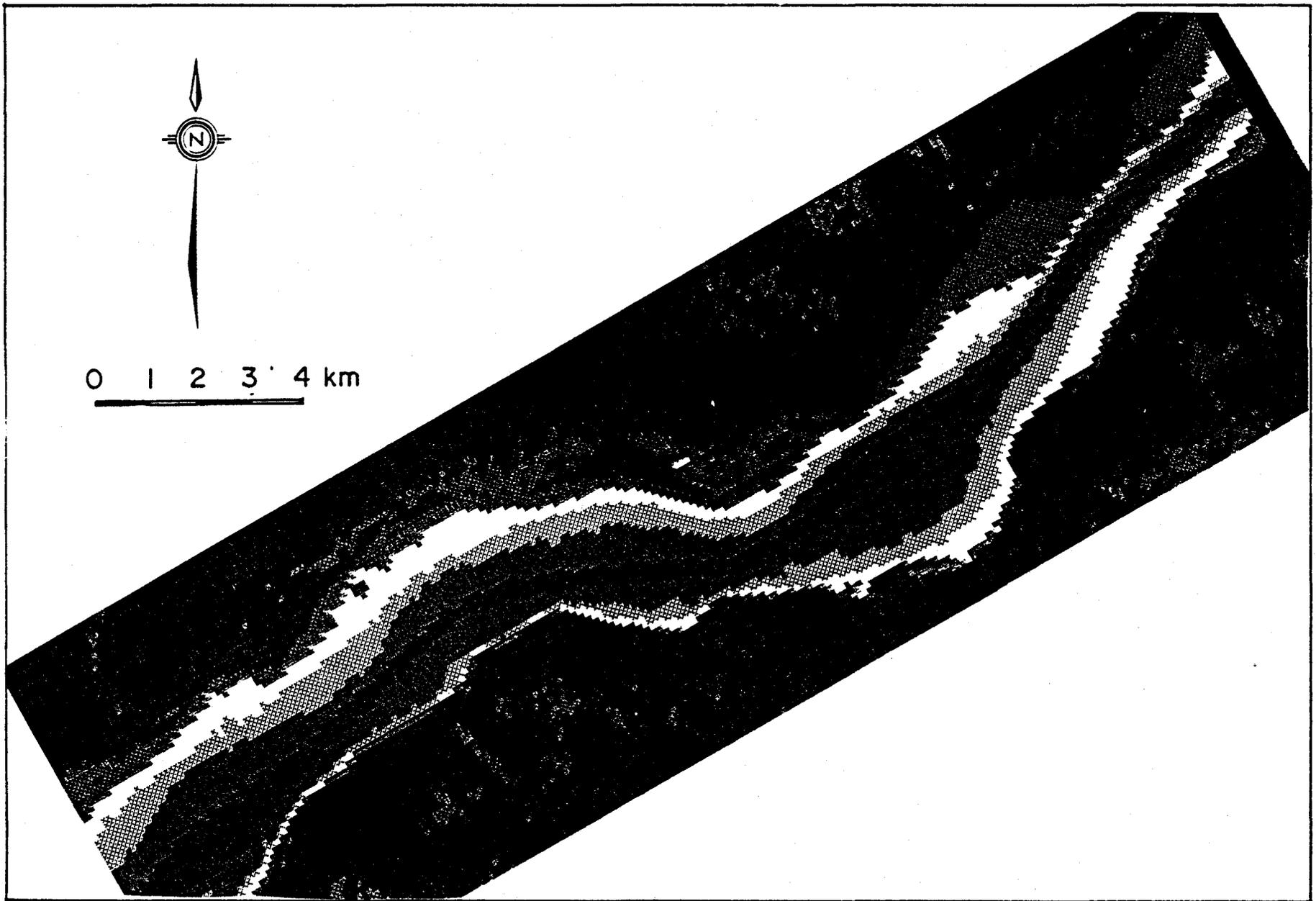


Figure 3.6: Image dans l'infra-rouge thermique des eaux du fleuve Saint-Laurent dans la région de Grondines (prise lors d'un survol le 25 octobre 1986 à marée baissante).

4. ANALYSE DE SENSIBILITÉ: CHOIX D'ÉVÉNEMENTS DE RÉFÉRENCE

Dans le but d'étendre l'analyse du milieu à une gamme de conditions variées représentatives de la variabilité des sollicitations sur l'écoulement, on choisit des événements dits "de référence" à cet effet. Le débit résiduel du fleuve, la marée et le vent sont susceptibles de jouer un rôle. Notre analyse de sensibilité a surtout porté sur le débit et la marée et quatre événements en ont fait l'objet.

- l'étiage moyen d'automne du 15 novembre 1968: débit de 9600 m<sup>3</sup>/s (2 marées consécutives de 2 m à Grondines);
- le débit module du 23 novembre 1976: débit de 11,200 m<sup>3</sup>/s (marées consécutives de 2.4 et 1.9 m à Grondines);
- l'événement témoin de calibration du 25 octobre 1986: débit de crue moyenne d'automne de 13500 m<sup>3</sup>/s (marées consécutives de 1.6 m et .8 m à Grondines);
- la crue moyenne de printemps du 15 mai 1979: débit de 17200 m<sup>3</sup>/s (marées consécutives de 2 m et 1.5 m à Grondines).

Ces événements ont été choisis pour représenter statistiquement les événements hydrologiques typiques des 10 dernières années; ceux-ci reflètent une tendance à l'augmentation générale des débits du fleuve sans doute consécutive aux apports accrus des Grands-Lacs (figure 4.1). La série hydrologique utilisée pour cette analyse provient du MENVIQ et résulte d'une somme de débit simultanés du fleuve à Montréal et de ses principaux tributaires entre cette ville et l'amont du modèle. Les périodes-cibles annuelles du 15 novembre au 15 janvier pour l'automne et du 15 avril au 31 mai pour le printemps ont été adoptées afin de témoigner respectivement des conditions hydrologiques du fleuve en période de montaison et d'avalaison du Poulamon de l'Atlantique.

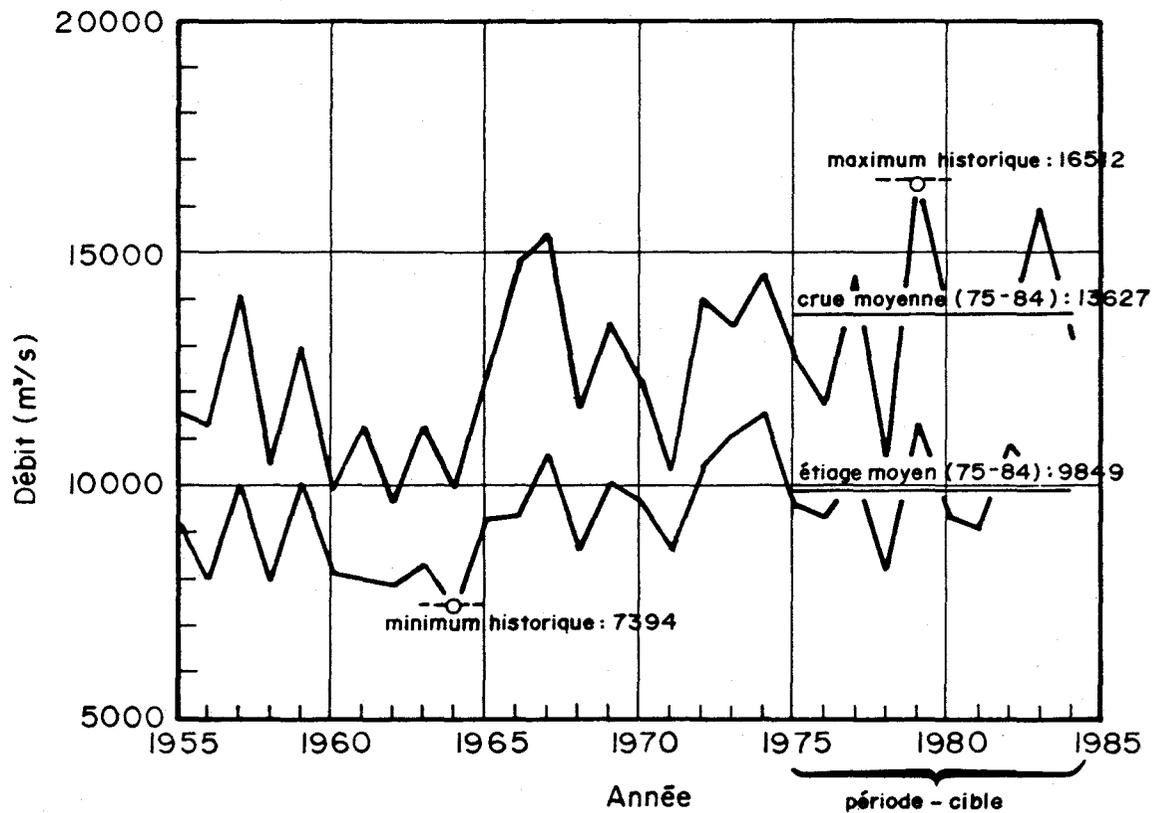
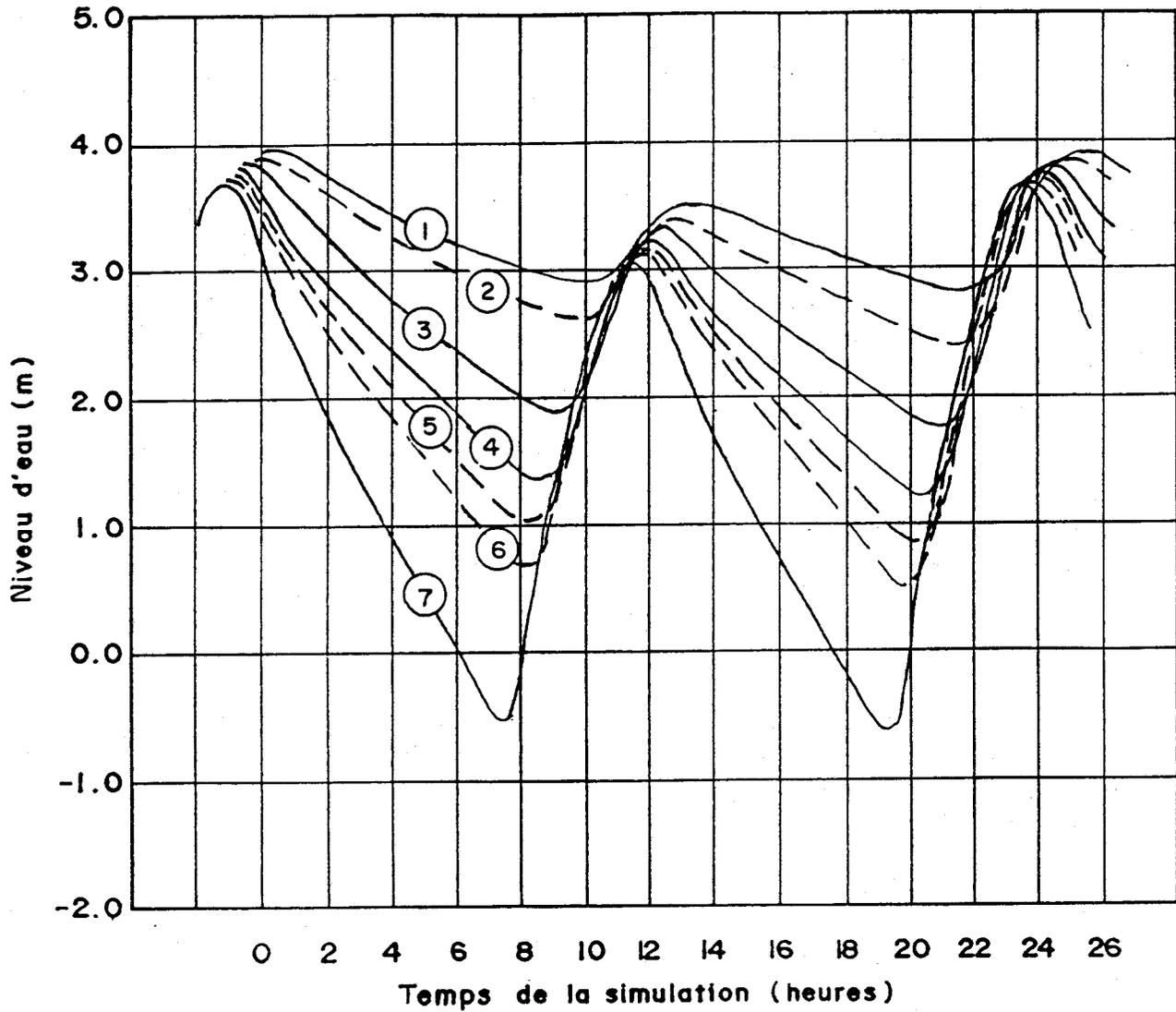


Figure 4.1 Minimum et maximum annuels du débit net du Saint-Laurent à l'amont de la Sainte-Anne entre le 15 novembre et le 15 janvier

Les données de débit ne sont pas imposées au modèle. Elles servent uniquement à vérifier le débit simulé par celui-ci. Par contre, le niveau d'eau résultant de la marée est imposé au modèle à l'amont et à l'aval de celui-ci. Des données marégraphiques en ces sites précis n'étant pas disponibles, on a dû interpoler des marégrammes à partir des données mesurées en différents endroits: Portneuf, Grondines, Cap-à-la-Roche et Batiscan. La figure 4.2 permet d'observer la déformation de l'onde de marée entre Portneuf et Batiscan pour l'événement-cible du module d'automne (25 novembre 1976). On remarque en particulier autour de 22-24 heures (temps de la simulation) que le niveau d'eau à l'aval (Portneuf) surpasse celui de l'amont (Batiscan), ce qui est la cause fondamentale des inversions de courant qui se produisent occasionnellement dans ce tronçon du fleuve à marée montante.



LÉGENDE

- |                   |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| ————— : mesuré    | - - - - - : inter ou extrapolé |
| 1 Batiscan        | 4 Grondines                    |
| 2 Amont du modèle | 5 Aval (modèle 2)              |
| 3 Cap-à-la-Roche  | 6 Aval (modèle 1)              |
|                   | 7 Portneuf                     |

Figure 4.2: Marégrammes observés ou interpolés dans le fleuve Saint-Laurent entre Portneuf et Batiscan (23 novembre 1976) - module d'automne

Nous avons tenu compte du rôle de la rivière Sainte-Anne en imposant son débit au modèle et en laissant son niveau d'eau s'ajuster de lui-même. Les débits de mêmes caractéristiques statistiques que le fleuve ont été choisis. Une correction tenant compte de son comportement estuarien a cependant été rajoutée au débit résiduel de base.

5. EXTRAPOLATION DU MODÈLE AUX CONDITIONS FUTURES

Une fois ajusté sur le milieu actuel, le modèle a servi lors de l'analyse de sensibilité à produire un ensemble de conditions de référence pour fins de comparaison avec les conditions à survenir en présence des futurs aménagements. Ces événements futurs sont obtenus une fois modifié le modèle géométrique (figure 5.2) dans le but de tenir compte des jetées temporaires (figure 5.1) à être construites. On remarque que l'extension spatiale du modèle reste la même. Cependant la densité du maillage est accrue considérablement afin de mieux capter les effets locaux produits par les jetées. Il en résulte un modèle de 771 éléments. Les paramètres de ce modèle doivent, par définition, être les mêmes que le milieu actuel. Les conditions aux limites ouvertes ont été imposées aux mêmes valeurs que le modèle actuel.



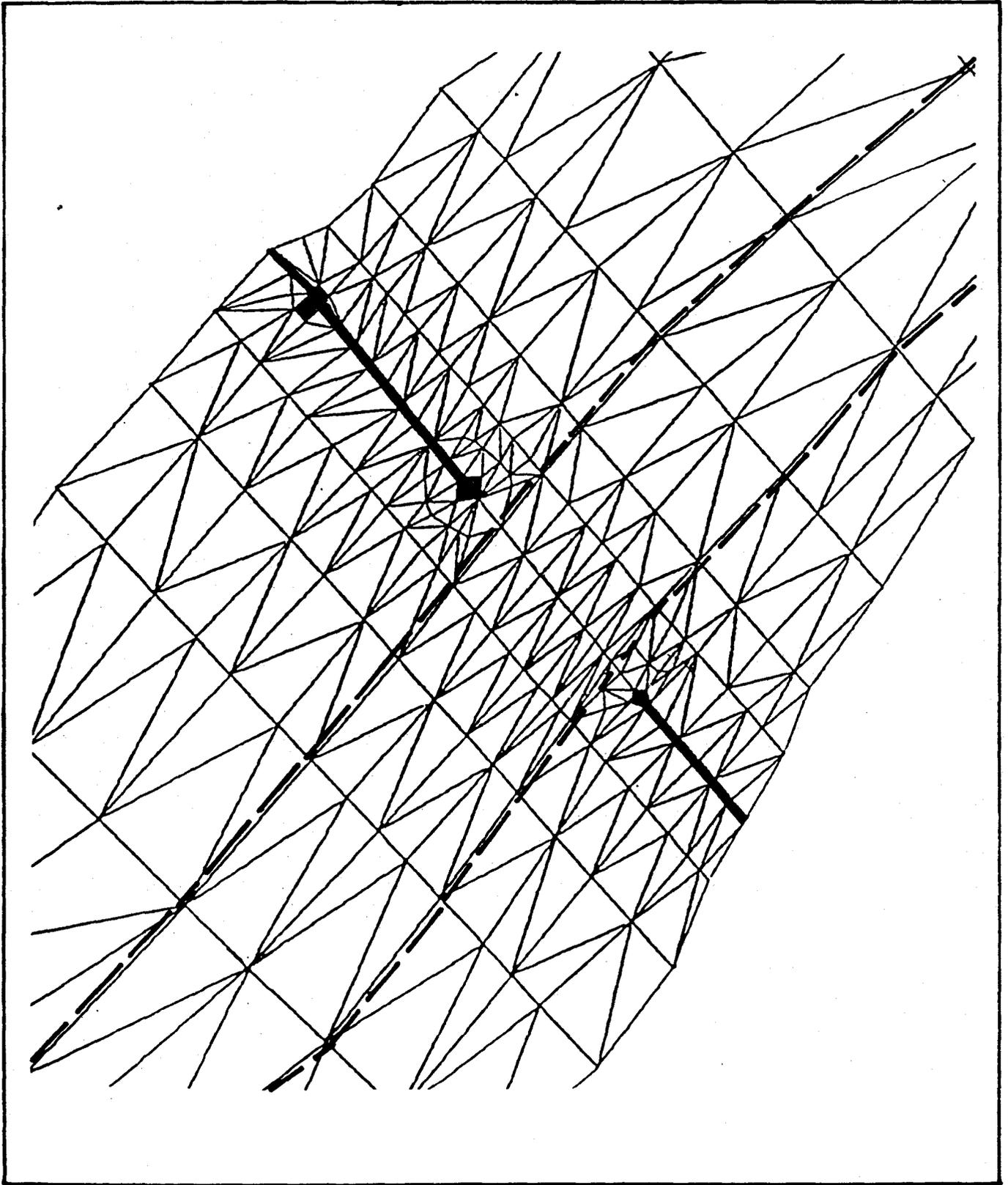


Figure 5.2: Discrétisation du milieu à l'étude (771 éléments T-6) pour l'étude du scénario Bois-des-Hurons, vue détaillée de l'axe Bois-des-Hurons.

6. DESCRIPTION DES RÉSULTATS - ANALYSE COMPARATIVE

L'analyse comparative des résultats sur le milieu futur projeté - vs - le milieu actuel a été menée en considérant:

- les changements à survenir dans l'espace;
- les changements dans le temps;
- l'habitat du poulamon atlantique.

Changements dans l'espace

Tous les résultats des états de référence actuels et futurs ont fait l'objet d'une visualisation en couleur à l'aide du logiciel graphique HYGRAF. Quatre moments du cycle de la marée ont été retenus pour démontrer l'influence spatiale des ouvrages:

- une marée haute;
- une marée mi-baissante;
- une marée basse;
- une marée mi-montante.

Il en est résulté une quantité considérable d'illustrations (annexes 1 à 3 du rapport principal) desquelles on peut extraire des conclusions dominantes sur le milieu actuel et l'effet général des structures.

Nous allons donc considérer ici les comportements communs à l'ensemble des états et qu'on peut observer à l'échelle d'ensemble du milieu étudié.

Dans le fleuve Saint-Laurent, les écoulements se produisent principalement dans le chenal central. En présence d'estrans importants comme dans l'axe de Bois-des-Hurons, on estime à plus de 90% la fraction typique du débit qui transite en moyenne dans la section centrale. Évidemment, ce pourcentage peut varier selon la phase de la marée et le niveau moyen du fleuve lequel dépend du vent et du débit résiduel. Il reste donc une fraction très réduite du débit qui transite sur les estrans (4-6% sur chacun).

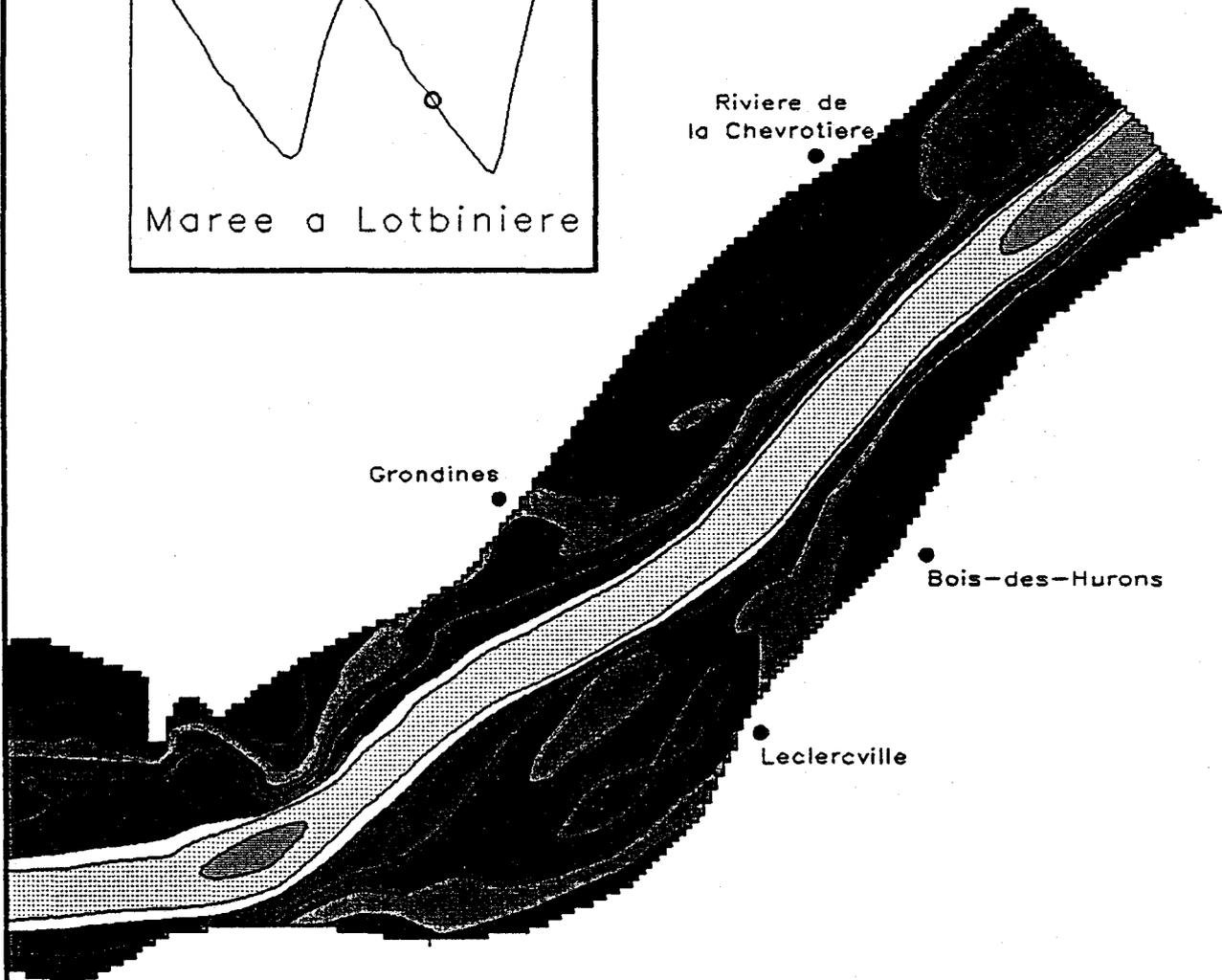
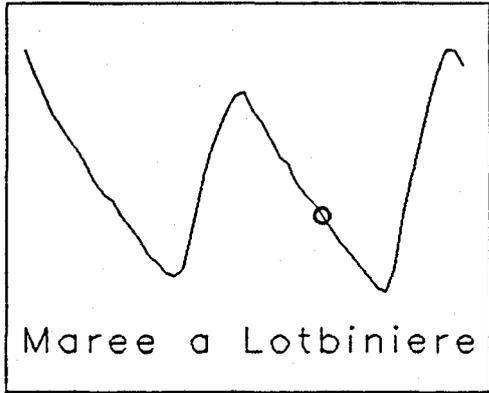
À titre d'exemple, la figure 6.1 (planche Hur.A.Aut.Mod 2.4 de l'annexe infographique No 1) illustre en isovaleurs l'intensité du courant entre la pointe de Grondines et l'aval du modèle à la phase mi-baissante de la marée pour le module d'automne. À pleine marée baissante, les vitesses moyennes dans la section centrale se situent entre 1 et 2 m/s et dépassent souvent les 2 m/s dans la section située en face du quai de Lotbinière et un peu à l'aval de la pointe de Grondines. Cette force du courant s'explique par l'importance relative plus limitée des effets de couche limite turbulente dans les zones profondes.

Par opposition, les vitesses sur les estrans sont beaucoup plus faibles variant typiquement entre 0 m/s lors du découverture et 0,3-0,4 m/s à marée baissante. Il est à noter d'ailleurs que c'est dans l'axe des jetées projetées de Bois-des-Hurons qu'on trouve les courants les plus faibles dans l'ensemble du modèle et ce, sur une distance qui s'étend sur plus de trois kilomètres longitudinalement.

La transition des vitesses lentes des estrans vers les courants plus forts du chenal s'effectue plus ou moins rapidement (100-300 m) selon la pente transversale du lit d'écoulement. C'est dans l'axe Bois-des-Hurons que la transition est la plus abrupte.

Un peu à l'amont de l'axe du quai de Grondines, l'élargissement de la zone profonde du fleuve a pour effet de créer des courants relativement rapides dans la zone rapprochée du littoral. Les courants peuvent même atteindre des valeurs de .5-.7 m/s dans les forts débits à marée baissante. Il en est de même à l'amont de la pointe de Grondines.

L'inversion occasionnelle des courants à marée montante est un des aspects les plus importants de la structure générale des écoulements du fleuve dans la région étudiée. En effet, dans certaines circonstances particulières (débit d'étiage du fleuve, marée de grande amplitude), il se produit un basculement de la pente du fleuve suffisamment important pour que l'écoulement soit renversé de l'aval vers l'amont (flot).



Module de vitesse

	m/s
	0.0 - 0.1
	0.1 - 0.2
	0.2 - 0.3
	0.3 - 0.4
	0.4 - 0.5
	0.5 - 0.8
	0.8 - 1.0
	1.0 - 1.5
	1.5 - 2.0
	2.0 - 5.0

 **Hydro-Quebec**  
 Direction  
 Environnement

---

 **TAO**  
 Simulations

CRANI  
 INRS-eau  
 Dept. Genie civil  
 Universite Laval

---

Projet Poulamon

---

Hygraf 2.0

Planche Hur.A.Aut.Mod 2.4    Figure 6.1  
 Bois des Hurons actuel - Module d'automne

Ce comportement illustré pour le module d'automne à la figure 6.2 avait déjà fait l'objet d'observations "in situ" rapportées par le Service hydrographique du Canada (1985, Instructions nautiques - Golfe et fleuve Saint-Laurent, voir la figure 6.3).

La cause (pente négative) est directement liée au niveau maximum atteint par la marée et à son temps de propagation. Ainsi, en considérant à titre d'exemple la figure 4.2 l'épisode de marée de 22h00 à 24h00 montre un niveau à Portneuf supérieur à celui prévalant à Batiscan. La différence de pression hydrostatique qui résulte de cet écart de niveau provoque d'abord un ralentissement des courants (décélération) puis, si cette sollicitation persiste suffisamment longtemps, un étalement de marée (courant nul) et enfin, une inversion du courant.

Plusieurs phénomènes hydrodynamiques particuliers se produisent en conjonction avec cette phase d'inversion:

- tourbillons non-stationnaires à l'échelle de 1 km précédant les étales de la marée haute et de la basse mer;
- courants opposés dans le chenal et sur les estrans;
- courants transversaux sur les estrans (vidange et remplissage des battures).

Notons que l'inversion occasionnelle des courants est un facteur susceptible d'aider la migration du poulamon atlantique puisque celui-ci peut alors profiter du sens favorable des courants pour s'acheminer vers son lieu de fraie.

En ce qui concerne le mélange des eaux de la rivière Sainte-Anne dans le fleuve, on remarque qu'en général, le "panache" occupe une portion très variable du littoral dépendant surtout de la vitesse des courants qui y prévalent. Ainsi, entre la pointe de Grondines et le lieu indiqué Grondines sur nos illustrations (voir la figure 6.4, mi-baissant du module d'automne, planche Hur.A.Aut.Mod 3.4 de l'annexe infographique

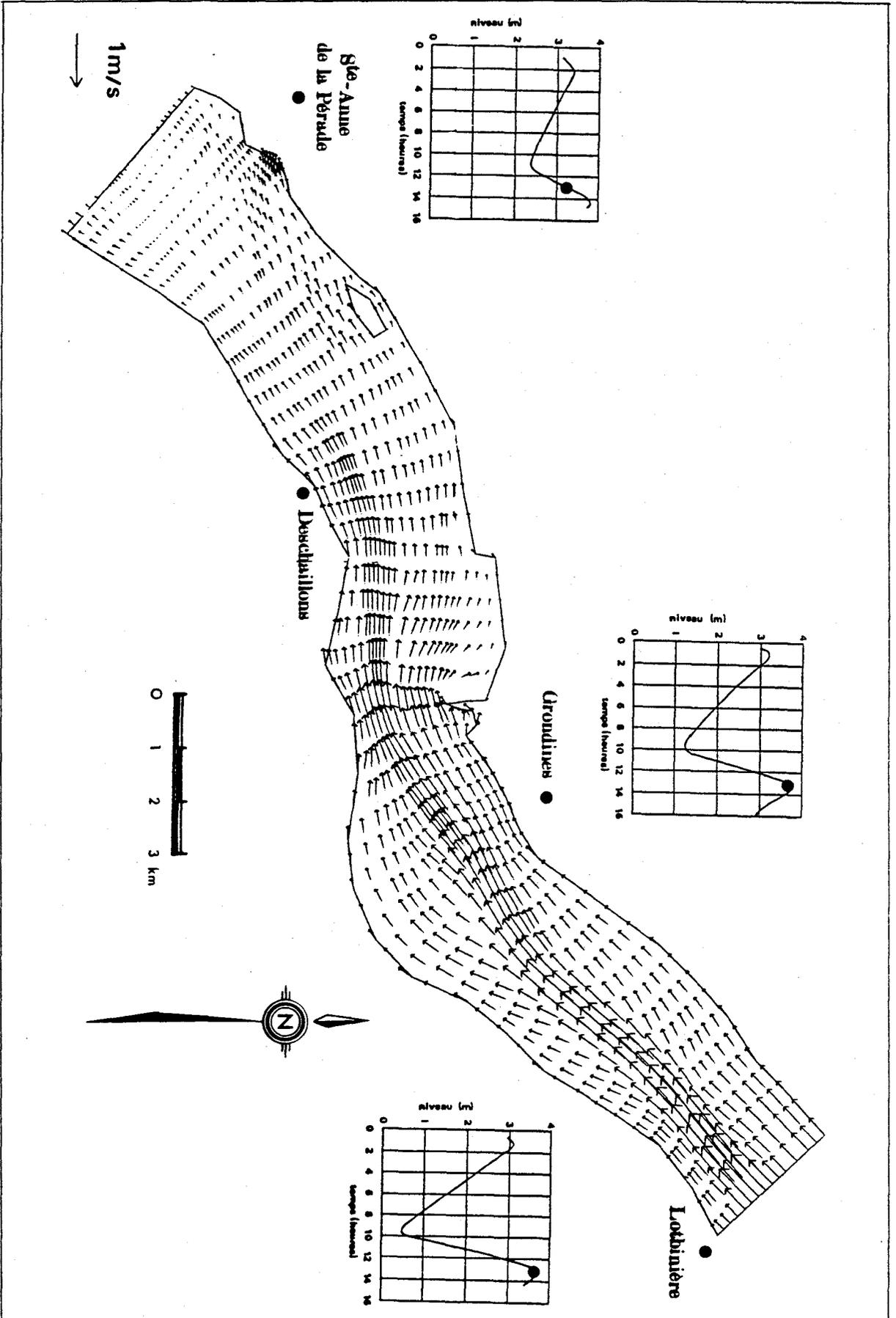


Figure 6.2 Fleuve Saint-Laurent de Lotbinière à Ste-Anne de la Pérade - Hydrodynamique, vecteurs-courants simulés 11h30 après la pleine mer inférieure à Grondines.

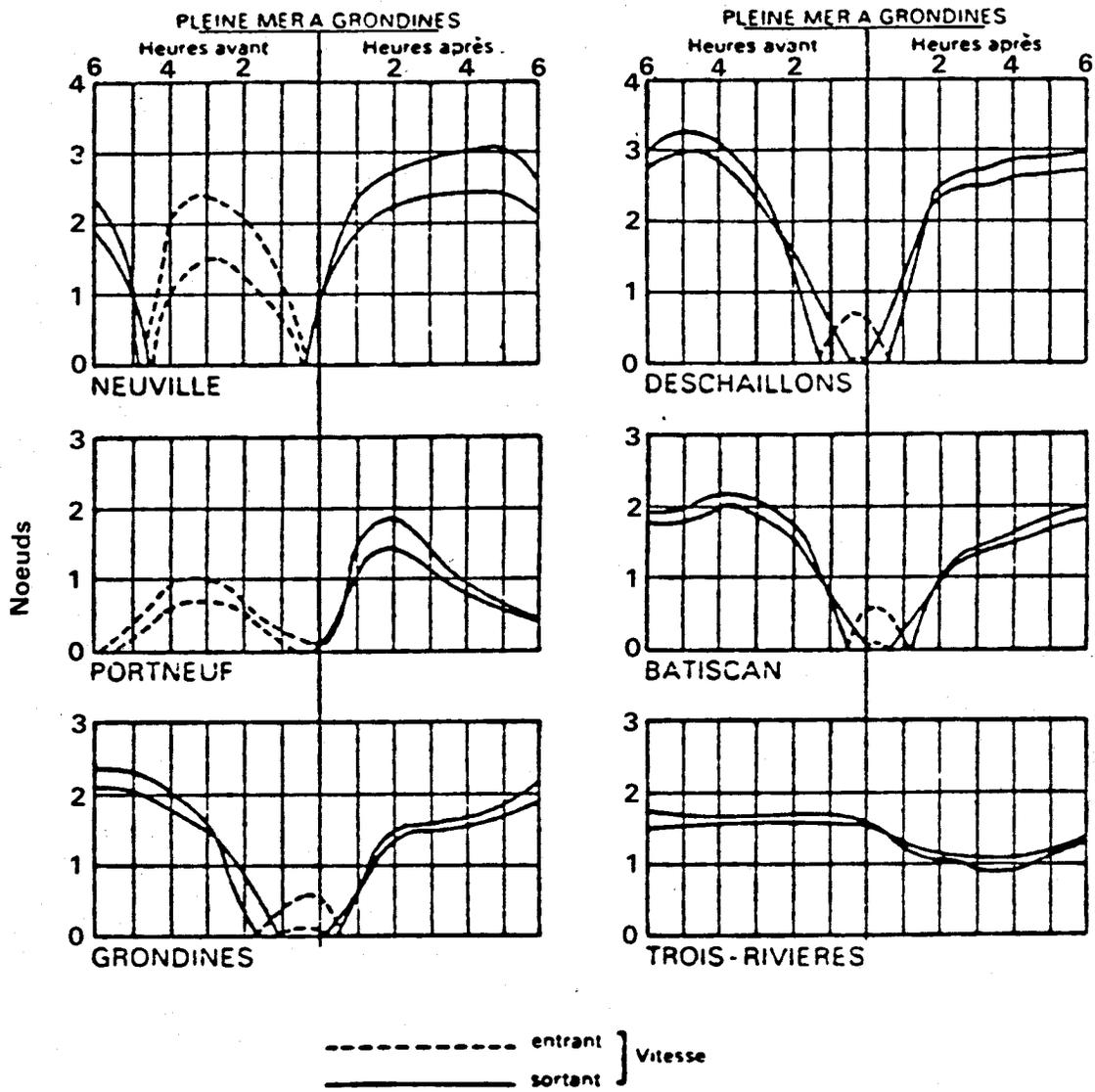
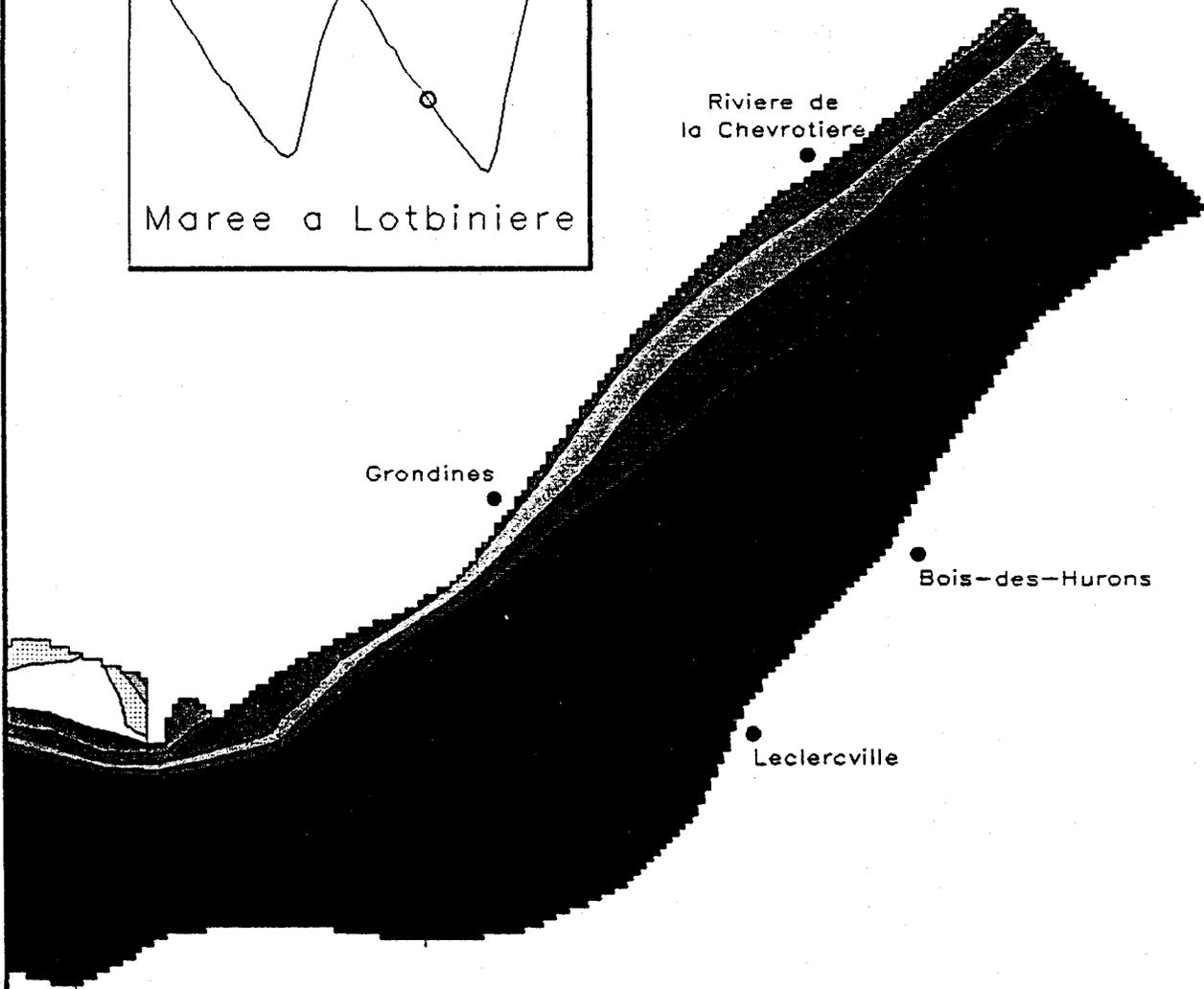
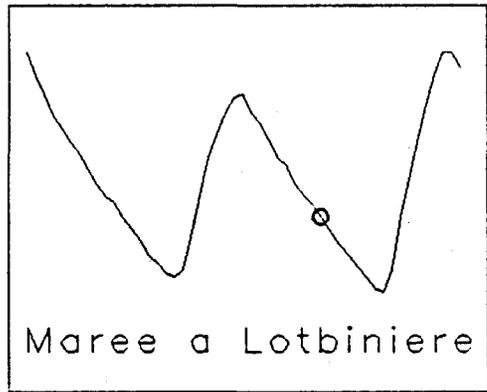
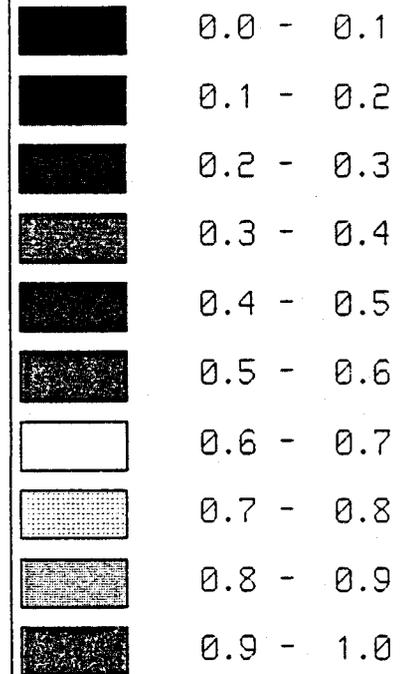


Figure 6.3 Courants mesurés dans le chenal de navigation à 3 mètres sous la surface en marée moyenne et en marée de vive-eau. (Tiré des Instructions Nautiques, Golfe et fleuve Saint-Laurent).



Conductivite relative



Hydro-Quebec

Direction  
Environnement

**TAC**  
Simulations

CRANI  
INRS-eau  
Dept. Genie civil  
Universite Laval

Projet Poulamon

Hygraf 2.0

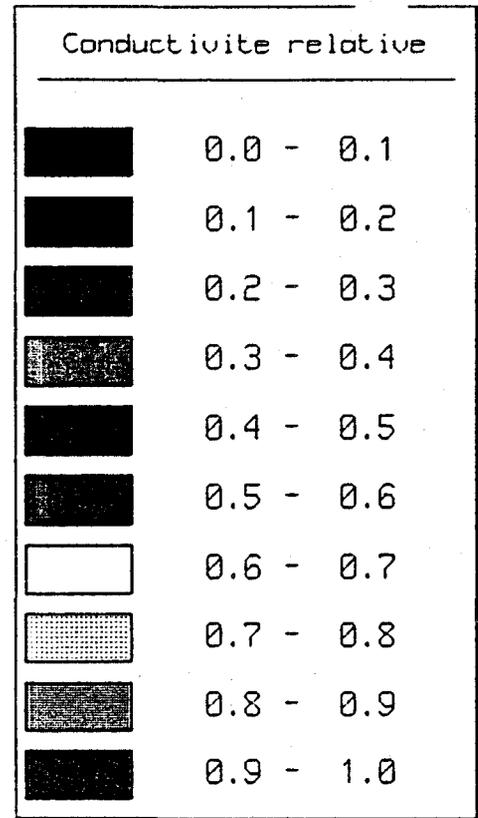
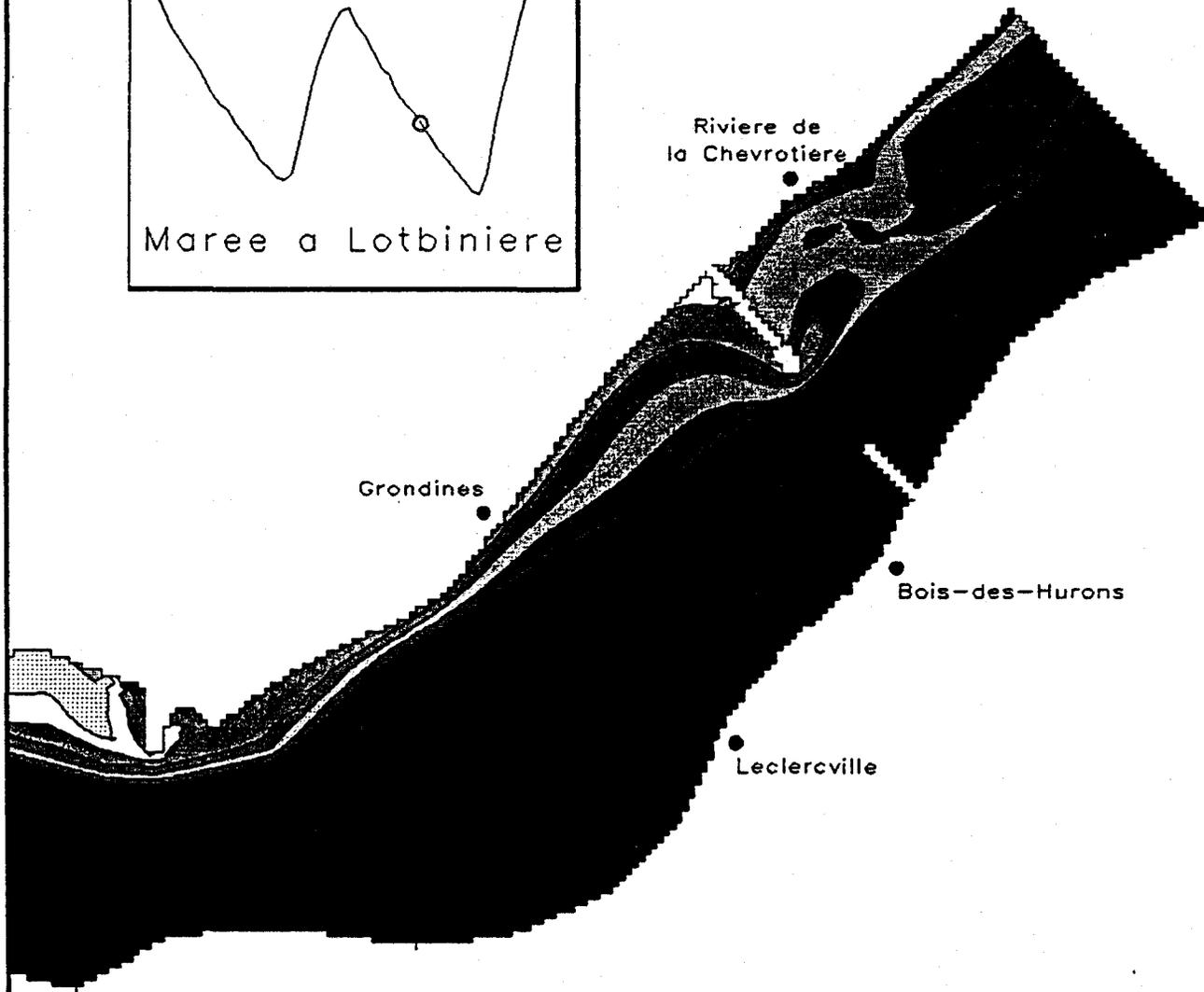
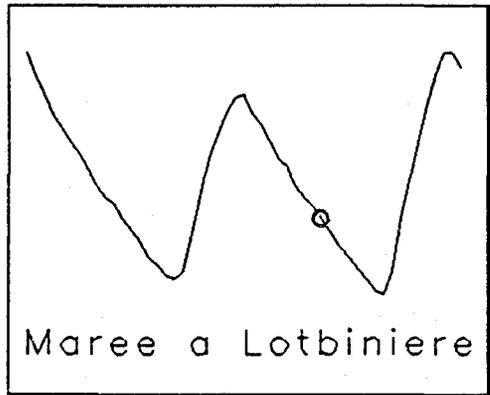
Planche Hur.A.Aut.Mod 3.4 Figure 6.4  
Bois des Hurons actuel - Module d'automne

No 1), le panache a tendance à "s'étirer" en raison des vitesses accrues qu'on y retrouve. Le taux de dilution a également tendance à augmenter rapidement autour de la pointe de Grondines. Ce changement rapide est dû aux fortes variations de vitesse en direction et en intensité ou aux circulations secondaires dans cette zone.

Dans la zone aval du modèle, c'est-à-dire, dans l'axe Bois-des-Hurons, la présence des deux côtés du fleuve de larges battures sur 2-3 km de distance longitudinale s'accompagne d'un ralentissement considérable des vitesses. Il s'ensuit automatiquement un élargissement du "panache" de la Sainte-Anne sur l'ensemble de cette zone (coté nord). Cet élargissement est assimilable à un phénomène d'accumulation. Nous verrons plus loin qu'un ralentissement additionnel des vitesses par l'implantation d'ouvrages tel des jetées peut encore accroître cet effet.

Les simulations avec jetées nous permettent d'observer que ces ouvrages n'ont pas d'influence sensible à l'échelle d'ensemble du domaine étudié sur l'hydrodynamique et la propagation de la marée. Cependant, ils produisent un effet d'accumulation des eaux provenant de la rivière Sainte-Anne en particulier entre l'axe Bois des Hurons et la pointe de Grondines. On peut, à titre indicatif, comparer les figures 6.4 et 6.5 (Planche Hur.F.Aut.Mod 3.4 de l'annexe infographique No 2). Cet effet se traduit par une superficie accrue d'occupation des estrans par ces eaux et également par une concentration relative supérieure.

Dans l'axe Bois-des-Hurons, l'influence locale des ouvrages se traduit par une déviation importante des écoulements vers la pointe de ceux-ci. La figure 6.6 (planche Hur.F.Aut.Mod. 2.4) permet d'illustrer ce constat. La déviation est ressentie sur les estrans sur une distance totale égale à deux fois la longueur des jetées (1 fois à l'amont, 1 fois à l'aval). Il s'ensuit une réduction importante des vitesses dans cette zone à mesure qu'on se rapproche de la berge et de la jetée.



Hydro-Quebec  
 Direction  
 Environnement

---

**TAO**  
 Simulations

CRANI  
 INRS-eau  
 Dept. Genie civil  
 Universite Laval

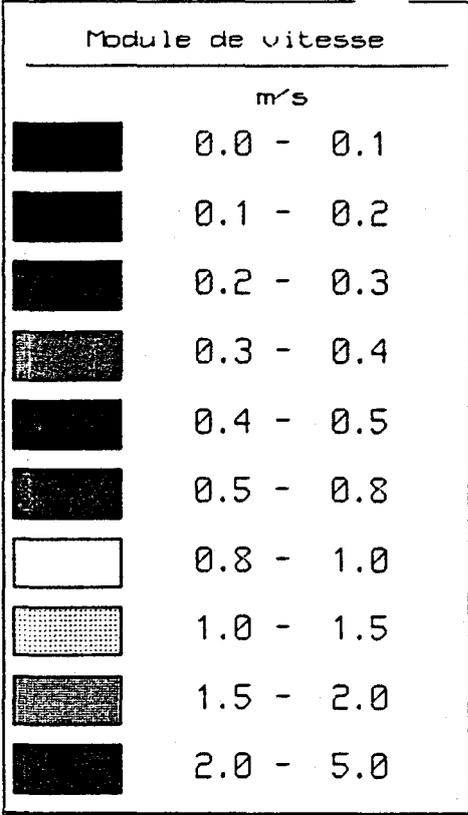
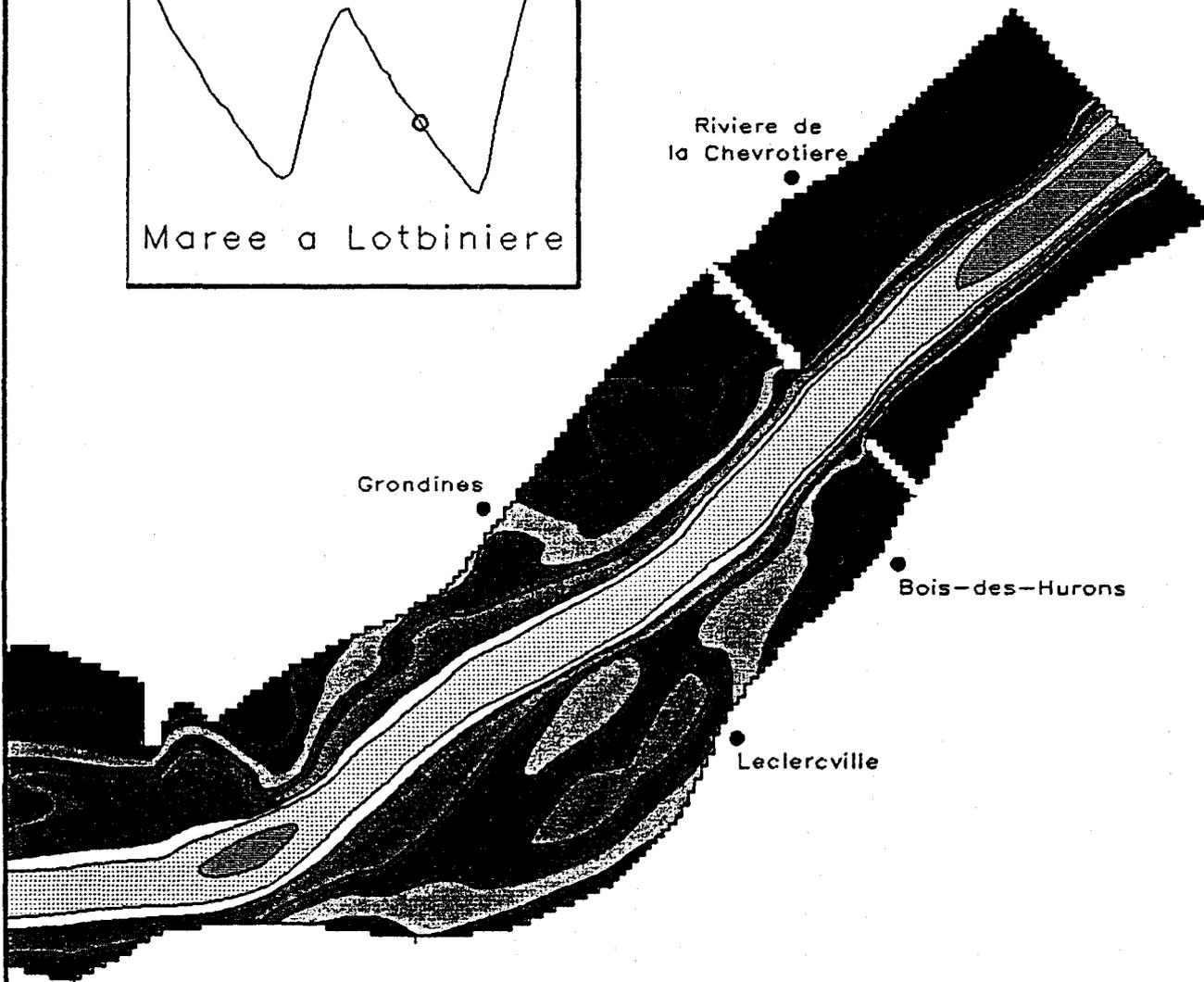
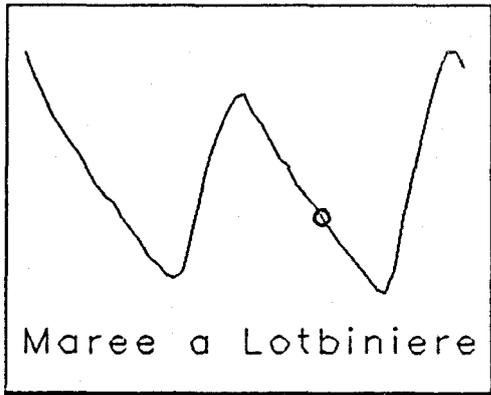
---

Projet Poulamon

---

Hygraf 2.0

Planche Hur.F.Aut.Mod 3.4 Figure 6.5  
 Bois des Hurons futur - Module d'automne



 Hydro-Quebec  
 Direction  
 Environnement

 CRANI  
 INRS-eau  
 Dept. Genie civil  
 Universite Laval

Projet Poulamon

Hygraf 2.0

Planche Hur.F.Aut.Mod 2.4      Figure 6.6  
 Bois des Hurons futur – Module d'automne

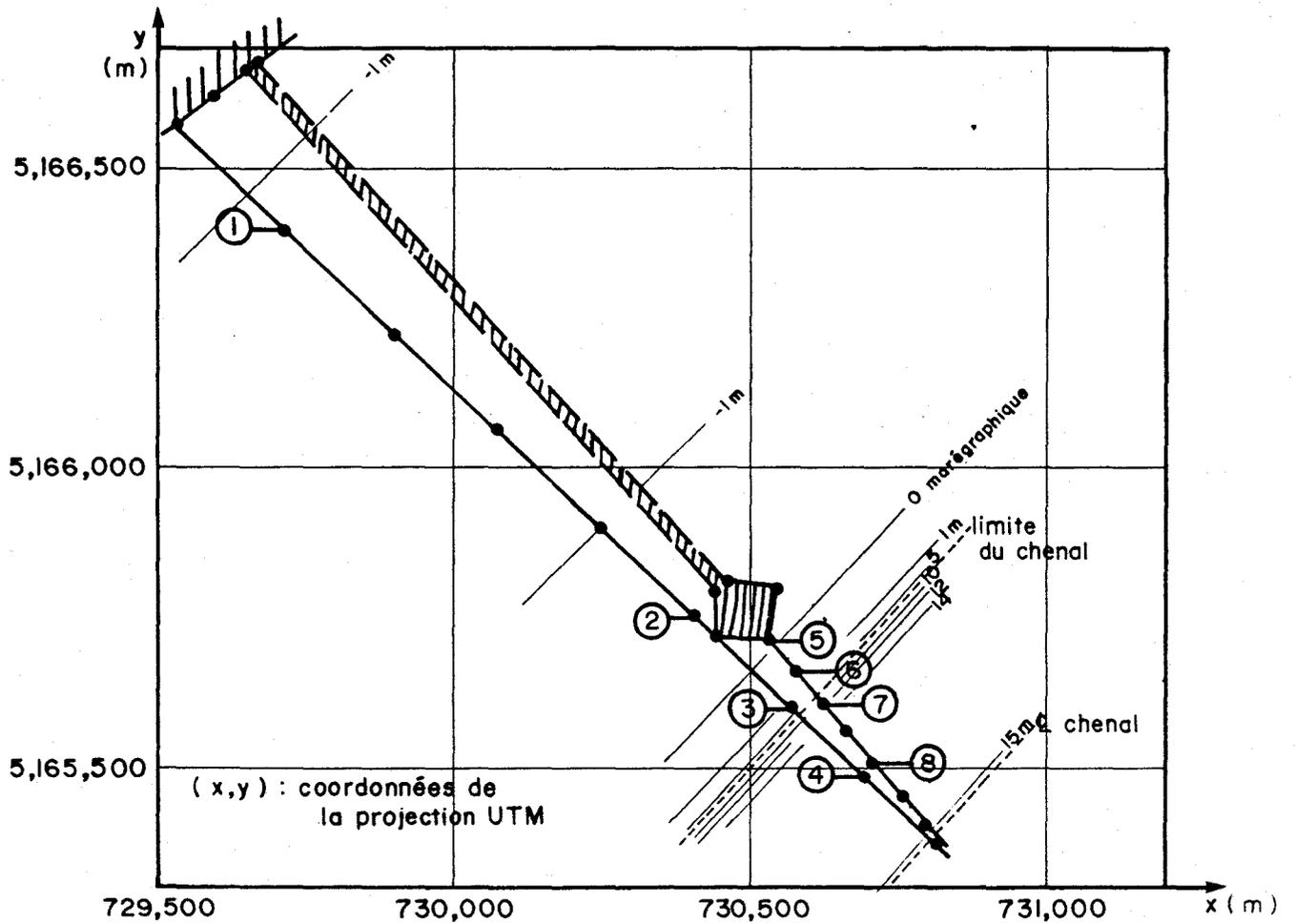
Dans la zone comprise entre l'extrémité de la jetée nord et le chenal de navigation, la vitesse du courant subira une augmentation générale de l'ordre de 10% et ce, quel que soit le débit résiduel du fleuve. Ceci ne veut pas dire que les conditions de migration du poulamon seront compromises par cette augmentation. À titre d'exemple, lors d'un renversement du courant (exemple: étiage et module d'automne), les conditions de migration pourraient même être améliorées puisque cette fois, le courant vers l'amont serait lui aussi augmenté localement.

#### Changement des courants en intensité et fréquence

Un traitement détaillé des conditions d'écoulement actuelles et futures à la pointe des jetées et dans l'axe de celles-ci et mettant l'emphase sur l'intensité et la fréquence des courants fait l'objet de cette section. Ces résultats seront considérés à la lumière du potentiel natatoire du poulamon.

La principale influence spatiale des jetées est, nous l'avons vu, de dévier une partie des écoulements qui transitent normalement sur les estrans vers la pointe des jetées. Dans le but d'analyser le régime hydrodynamique le long d'un transect dans l'axe Bois-des-Hurons, un certain nombre de noeuds des modèles actuel et futur ont fait l'objet d'un "suivi" numérique. On trouvera à la figure 6.7 un plan de localisation des noeuds du modèle géométrique qui ont retenu notre attention.

En conditions actuelles, une analyse préliminaire nous a révélé que deux noeuds sur l'estran (1 et 2) pouvaient très bien représenter la variabilité transversale de l'écoulement. Le noeud 3 à la limite de l'estran et le noeud 4 dans le chenal lui-même permettent de compléter le tableau. Les zones intermédiaires peuvent faire l'objet d'interpolation.



Légende

- les points 1, 2, 3 et 4 sont situés approximativement à 250, 1200, 1400 et 1600 m respectivement du littoral (celui du modèle);
- les points 5, 6, 7 et 8 sont situés à 0, 75, 140 et 270 m de l'extrémité de la jetée nord.

Figure 6.7: Plan de localisation des noeuds du modèle ayant fait l'objet d'une analyse temporelle

En présence de jetées, l'analyse nous a permis de retenir le noeud 5 à la pointe extrême de la jetée nord, le noeud 6 à la limite de l'estran, le noeud 7 à mi-chemin entre ceux-ci et enfin, le noeud 8 dans le chenal. Aucun noeud entre la pointe de la jetée et le littoral n'a été retenu et pour cause.

Les figures 6.8 à 6.11 montrent la vitesse du courant en fonction du temps pour chacun des points mentionnés. La vitesse est positive lors du jusant (baissant) et négative pendant le flot (montant).

Il avait été établi lors d'une étude préliminaire qu'un potentiel natatoire minimum de 0,3 m/s pouvait être attribué au poulamon atlantique par analogie avec la lotte. Des études ultérieures de G. Shooner et associés (1987), consultants biologistes, ont permis de confirmer ce seuil normatif à partir de pêches au verveux faites dans le fleuve.

C'est pourquoi sur les figures 6.8 à 6.11, le seuil normatif 0,3 m/s a été mis en évidence de sorte que l'on puisse chaque fois identifier et quantifier les phases de la marée propices à la migration ( $V < 0,3$  m/s) de même que la distance (en mètres) depuis la berge (la pointe de la jetée pour le scénario futur) constituant ce que nous avons désigné "la section transversale franchissable".

Considérons maintenant chacun des débits simulés à tour de rôle.

a) Étiage moyen d'automne (figure 6.8)

Dans les conditions actuelles (figure 6.8a) et pour la marée étudiée, les vitesses sur l'estran se situent entre 0,2-0,3 m/s au jusant et -0,15 m/s au flot. Ces conditions représentent typiquement ce qui doit se produire sur l'ensemble de l'estran jusqu'à l'endroit où se situera la pointe de la jetée nord. À la limite de l'estran, la vitesse de flot atteint 0,5 m/s la moitié du temps.

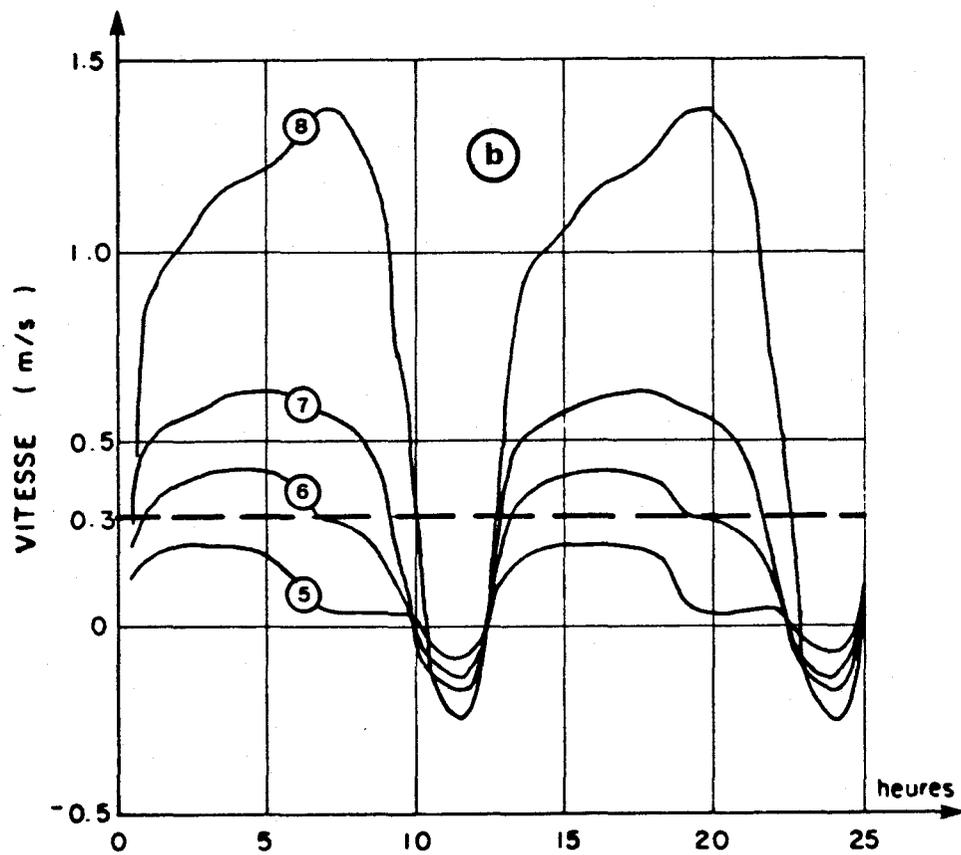
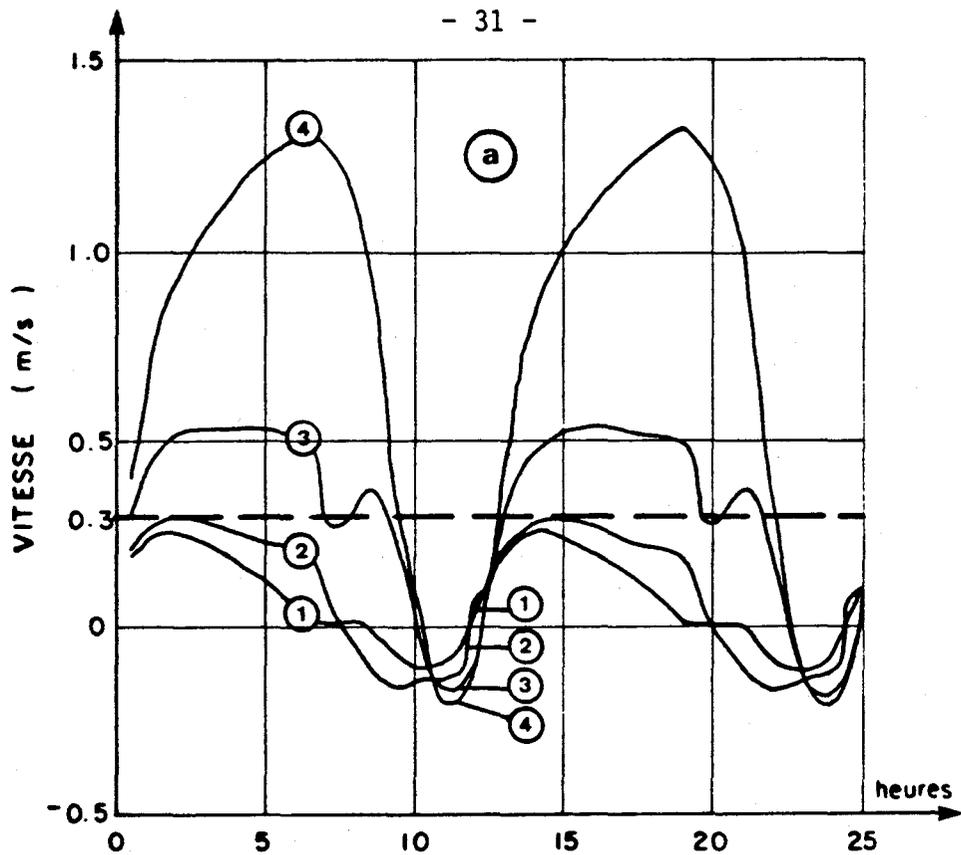


Figure 6.8 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - étiage moyen d'automne (voir la figure 6.7 pour la localisation des points 1 à 8).

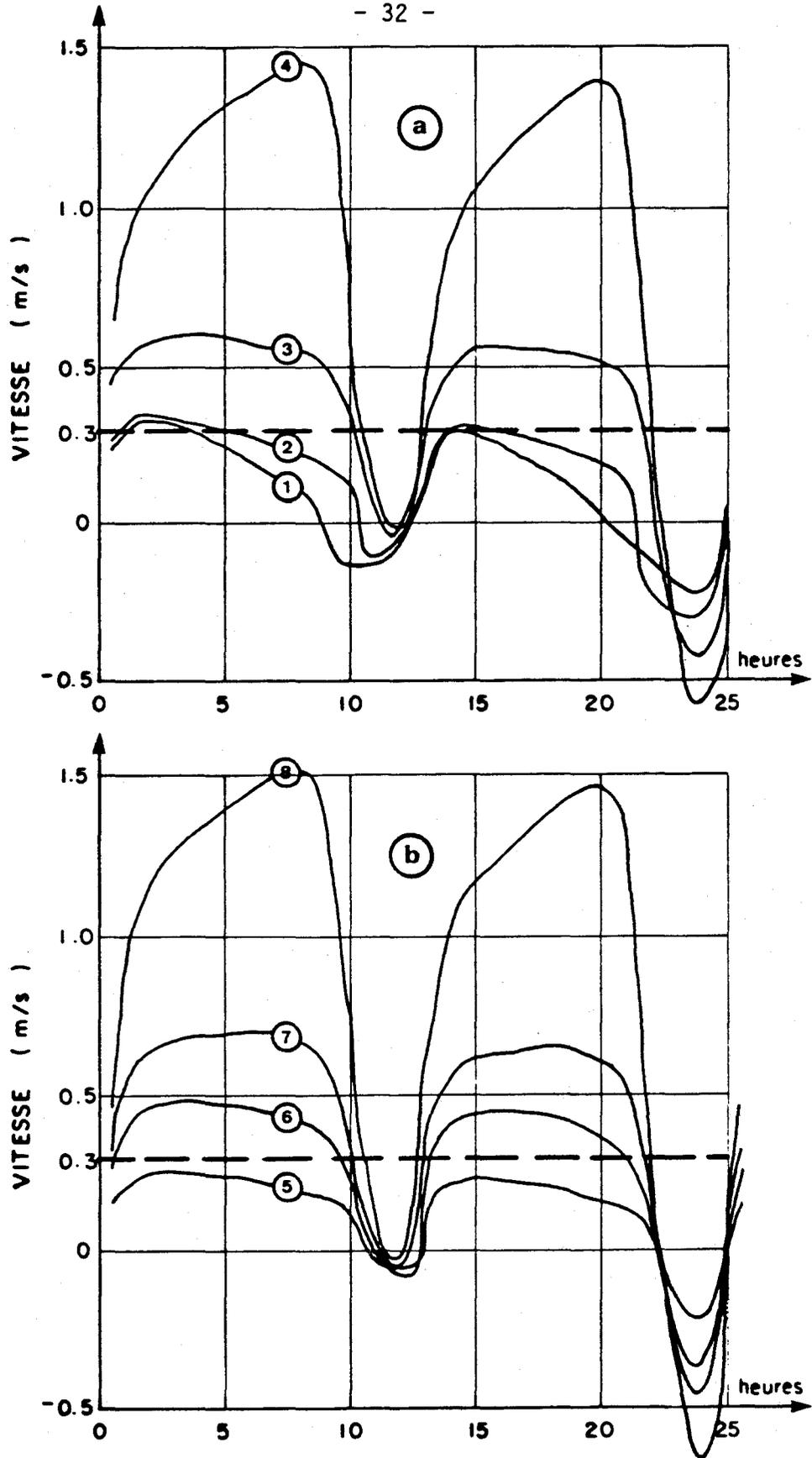


Figure 6.9 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - module d'automne  
- a: actuel; b: futur.

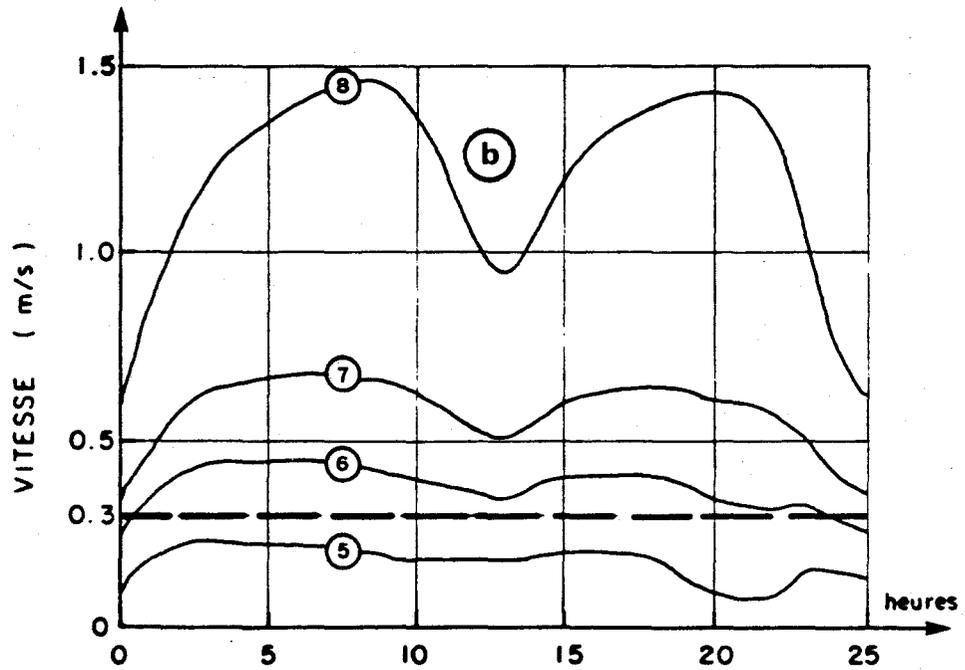
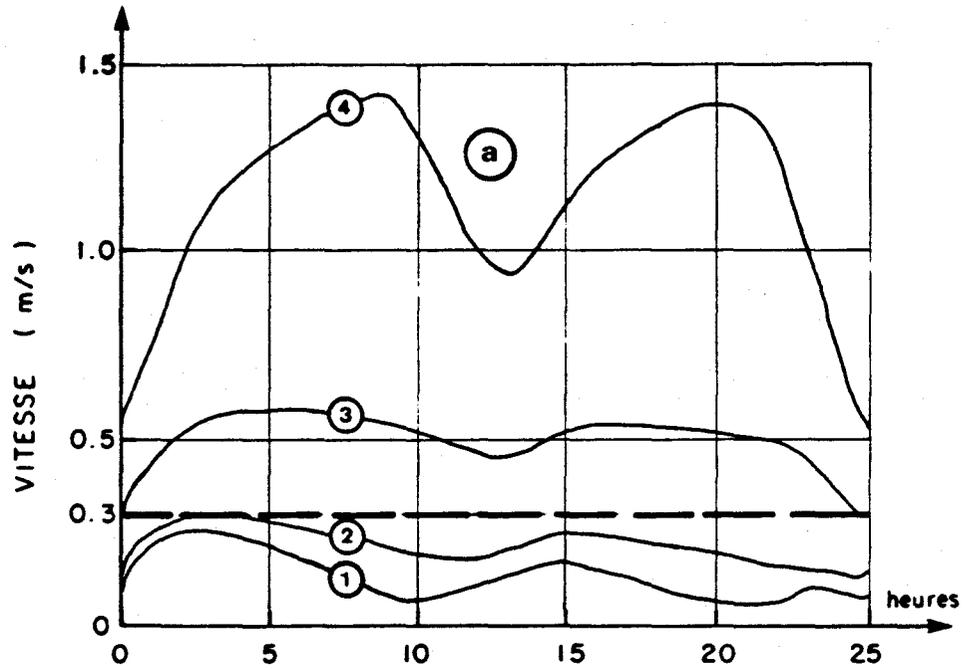


Figure 6.10 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - crue moyenne d'automne - a: actuel; b: futur.

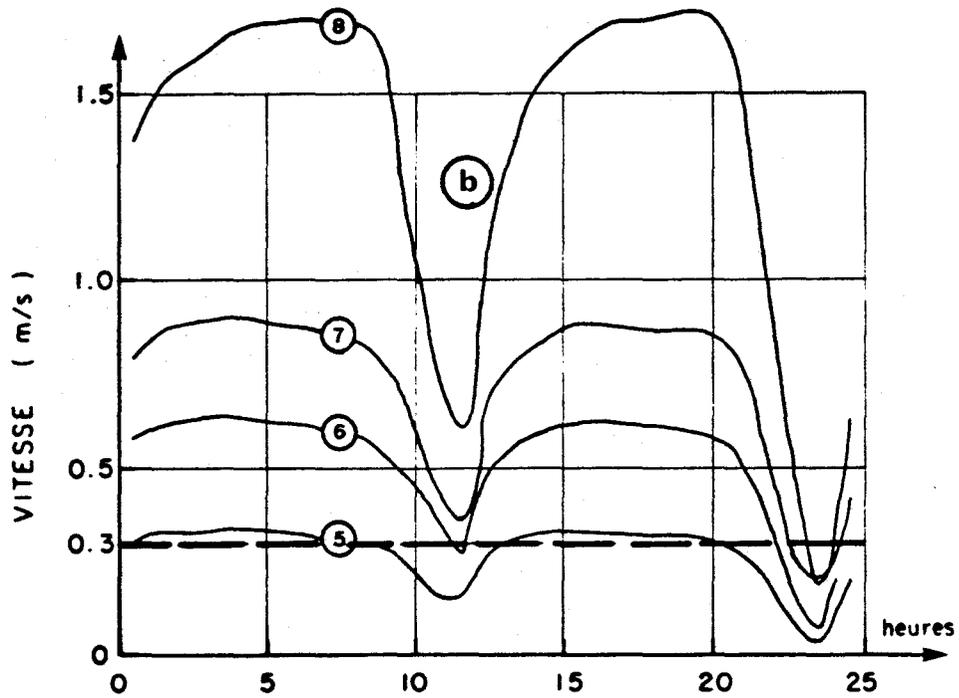
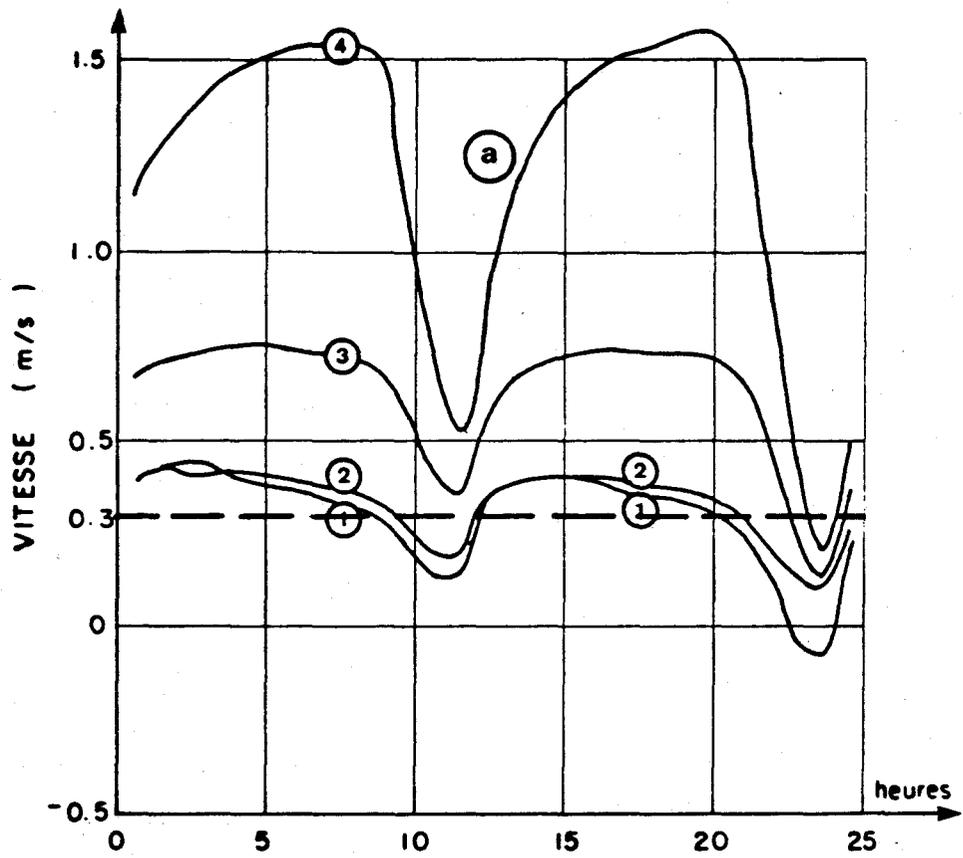


Figure 6.11 Conditions de vitesse dans l'axe Bois-des-Hurons - crue moyenne de printemps - a: actuel; b: futur.

À mesure qu'on progresse dans le chenal, la vitesse augmente rapidement pour atteindre une valeur maximale de 1,35 m/s au jusant. Cependant, au renversement du flot, le courant change de direction même dans le chenal (-0,2 m/s).

Dans les conditions futures (figure 6.8b) les vitesses entre la pointe de la jetée nord et la limite du chenal varient de 0,22 m/s à 0,62 m/s au maximum du jusant. Dans le chenal, les vitesses de courant maximales (dans le temps) sont de l'ordre de 1,38 m/s dans les conditions actuelles. Cette valeur n'est pas significativement différente de celle des conditions actuelles étant donné que les noeuds 4 (actuel) et (futur) ne coïncident pas exactement.

Les conditions simulées de débit d'étiage ne permettent de mettre en évidence de difficultés notables en ce qui concerne la dynamique des courants à la pointe de la jetée projetée. En effet, dans la zone comprise entre le chenal et la structure, le courant s'inverse près de 20% du temps. De plus, 25% du temps le courant demeure en deçà du seuil 0,3 m/s considéré comme sécuritaire pour la migration du poulamon. Dans les conditions actuelles, la période propice (courant < 0,3 m/s) représentait également 25% du cycle de la marée. Seule la largeur de la section franchissable disponible subit un changement notable. En effet, la largeur actuelle d'estran propice à la migration varie entre 1 200 m (80% du temps) et 1 400 m (25% du temps). Dans les conditions futures (figure 6.4), on trouve au moins 40 m (100% du temps), 75 m (45% du temps) et 140 m (30% du temps) et l'ensemble de la section 20% du temps. Quoique cette différence de section soit considérable, il ne faudrait pas y voir un facteur susceptible de limiter nécessairement la migration.

b) Module d'automne (figure 6.9)

Sur l'estran actuel (figure 6.9a) et pour les conditions de marée étudiées, les vitesses sont de l'ordre de 0,2-0,35 m/s la majorité du temps du jusant. Comme la marée de cette simulation est d'assez grande amplitude conduisant à une inversion très importante du courant, les

vitesse du flot culminent à  $-0,3$  m/s lors du montant de la pleine mer supérieure.

À la limite du chenal et dans le chenal lui-même, les vitesses actuelles sont plus contrastées atteignant respectivement  $0,60$  et  $1,45$  m/s au jusant (noeuds 3 et 4) et  $-0,40$  et  $-0,60$  m/s au flot.

En comparant ce régime de vitesse au seuil de  $0,3$  m/s attribué au potentiel natatoire du poulamon, on trouve des conditions très favorables à la migration. En effet, sur l'ensemble de l'estran et pour presque tout le cycle de la marée simulée, les conditions de vitesse sont acceptables. En effet, les conditions sont favorables 80% du temps sur  $1\ 200$  m. De même, en incorporant les zones à proximité du chenal dans l'analyse, on trouve des conditions favorables sur  $1\ 400$  m 25% du temps et sur l'ensemble de la section du fleuve 15 à 20% du temps.

Dans ces conditions particulières, on comprendra que la présence de la jetée nord ne peut pas être problématique en terme de vitesse de courant. Cependant, les conditions favorables sur l'estran n'étant plus disponibles, la période et la section propices s'en trouvent réduites d'autant. Ainsi, entre la pointe de la jetée et le chenal, les vitesses de jusant se maintiennent entre  $0,25$  m/s et  $0,7$  m/s ce qui représente près de 60% du cycle. En considérant la période où le courant est inférieur à  $0,3$  m/s (figure 6.4) l'examen des résultats du modèle permet d'identifier des conditions favorables sur  $75$  m 30% du temps, sur  $140$  m 20 à 25% du temps et sur l'ensemble de la section d'écoulement entre les jetées 15-20% du temps.

c) Crue d'automne (figure 6.10)

La marée utilisée pour cette simulation est probablement parmi les plus défavorables à la migration du poulamon pour une crue d'automne moyenne. En effet, la faible amplitude de marée, en particulier la pleine mer inférieure, n'a pas permis de simuler - ni d'observer

d'ailleurs puisqu'il s'agit de l'événement de calibration - des inversions de courant notables. Au mieux, retrouve-t-on des conditions proches d'un étale à marée haute.

Résultant de ceci, on retrouve des conditions hydrodynamiques moins contrastées dans le cycle. Les vitesses maximales du cycle (jusant) sont d'ailleurs comparables à celles obtenues pour les débits d'étiage et module. Au flot cependant, les conditions sont très différentes puisque les vitesses se situent aux environs de 0,1 m/s (vers l'aval) en moyenne sur l'estran. Sur l'ensemble du cycle, les vitesses sur l'estran varient entre 0,05 et 0,3 m/s ce qui constitue des conditions toujours favorables en pratique (100% du temps sur 1 200 m). Par contre, plus on s'approche du chenal, plus les conditions s'éloignent - et très rapidement - du seuil de vitesse propice.

Dans les conditions futures, la section d'écoulement résiduelle entre la jetée nord et le chenal est la même que celle pour laquelle les vitesses deviennent vite défavorables dans le milieu actuel. À l'analyse des courbes (figure 6.10b), on observe que jusqu'à mi-chemin des noeuds 5 et 6 (40 m de section) les vitesses sont favorables 60% du temps; à 75 m les conditions ne deviennent favorables que 5% du temps.

On voit ici, rappelons-le, un comportement qui se distingue assez nettement des autres états de référence. En effet, tous les autres états comportent toujours une période, même minime, mais favorable sur l'ensemble de la section du fleuve entre les jetées. Dans le cas présent, le phénomène ne se produit pas. Cela est dû à la marée de l'événement qui est trop faible pour provoquer un ralentissement suffisant du courant dans le chenal. Cet événement permet ainsi de mettre en évidence l'importance relative du facteur marée par rapport au débit dans le comportement hydrodynamique du fleuve à cet endroit.

d) Crue moyenne du printemps (figure 6.11)

Quoique cette simulation ait été d'abord conçue pour mettre en évidence des structures tourbillonnaires stationnaires à proximité des jetées au

printemps, l'utilisation des résultats en termes de conditions de migration permet d'extraire des informations complémentaires et pertinentes concernant le rôle de la marée dans le régime des vitesses en régime de forte hydraulité. Commençons d'abord par cet aspect puis, nous verrons par la suite les points d'interprétation relatifs à l'avalaison du poulamon (tourbillons).

On constate d'abord en observant la figure 6.11a que malgré un débit de crue moyenne de printemps, la marée simulée a résulté en des vitesses d'écoulement plus variées et plus favorables à marée montante que la crue d'automne. Les paramètres de section - vs - temps sont les suivants:

- 1 200 m - 30% du temps;
- 1 400 m - 10% du temps;
- ensemble de la section - 5% du temps.

On voit donc que des conditions propices se produiraient de manière plus variée que lors de la crue d'automne. Dans le cas présent, même le chenal pourrait s'avérer praticable actuellement malgré le débit considéré et ce, à cause de la marée dont l'amplitude favorise un ralentissement appréciable du courant. Quoiqu'un tel débit soit rarement observé en automne, on constate que s'il se produisait en conjonction avec de fortes marées, les conditions de migration seraient encore favorables pendant un court laps de temps.

Les conditions d'écoulement futures seraient influencées par le même processus de ralentissement au flot. Il en résulte des vitesses d'écoulement globalement plus favorables que la crue d'automne avec marée de faible amplitude. Les paramètres de section - vs - temps sont les suivants:

- 40 m - 20% du temps;
- 75 m - 10% du temps;
- 140 m - 5% du temps;
- ensemble de la section - 3% du temps.

La figure 6.12 présente sur le même dessin une synthèse des courbes 6.8b à 6.11b (milieu futur). La section transversale franchissable en fonction de la durée dans le cycle de marée étudié est illustrée ici.

On observe ici le comportement singulier des écoulements pour la crue moyenne d'automne. Cette observation nous confirme la sensibilité particulière du milieu à l'amplitude de la marée. En effet, la crue d'automne est le seul événement qui a été simulé avec une marée de faible amplitude.

#### Tourbillons stationnaires

Du côté de la jetée sud, les simulations ont permis de mettre en évidence une structure tourbillonnaire de faible énergie à l'aval de l'ouvrage en particulier lors des débits de crue. Ce comportement transitoire est commun dans le fleuve surtout autour des épisodes de retournement. Il n'a pas été possible de mettre en évidence de tels comportements stables autour de la jetée nord. Tout au plus retrouve-t-on à l'occasion des tourbillons faibles et de courte durée (typiquement 30 minutes).

#### Comparaison avec les conditions actuelles à la pointe de Grondines

Il nous est apparu pertinent de rechercher ailleurs dans la région étudiée des conditions physiques analogues à celles susceptibles de se produire dans le futur à la pointe des jetées. La figure 6.13 (planche Hur.A.Aut.Crue 4.2 de l'annexe infographique No 1) nous montre une forme d'illustration utilisée dans ce rapport appelée "intersection de conditions". On y trouve des zones de couleurs homogènes correspondant à des gammes de valeurs données de vitesse et de profondeur. Ces valeurs définissent des zones favorables ou non à la migration. On remarque à l'examen de cette figure que pour des vitesses comprises entre 0 et 0,3 m/s et des profondeurs jusqu'à 3 m (zones bleu foncé et bleu royal), l'estran de l'axe Bois-des-Hurons représente la zone certainement la plus favorable pour la migration du poulamon. Par contre,

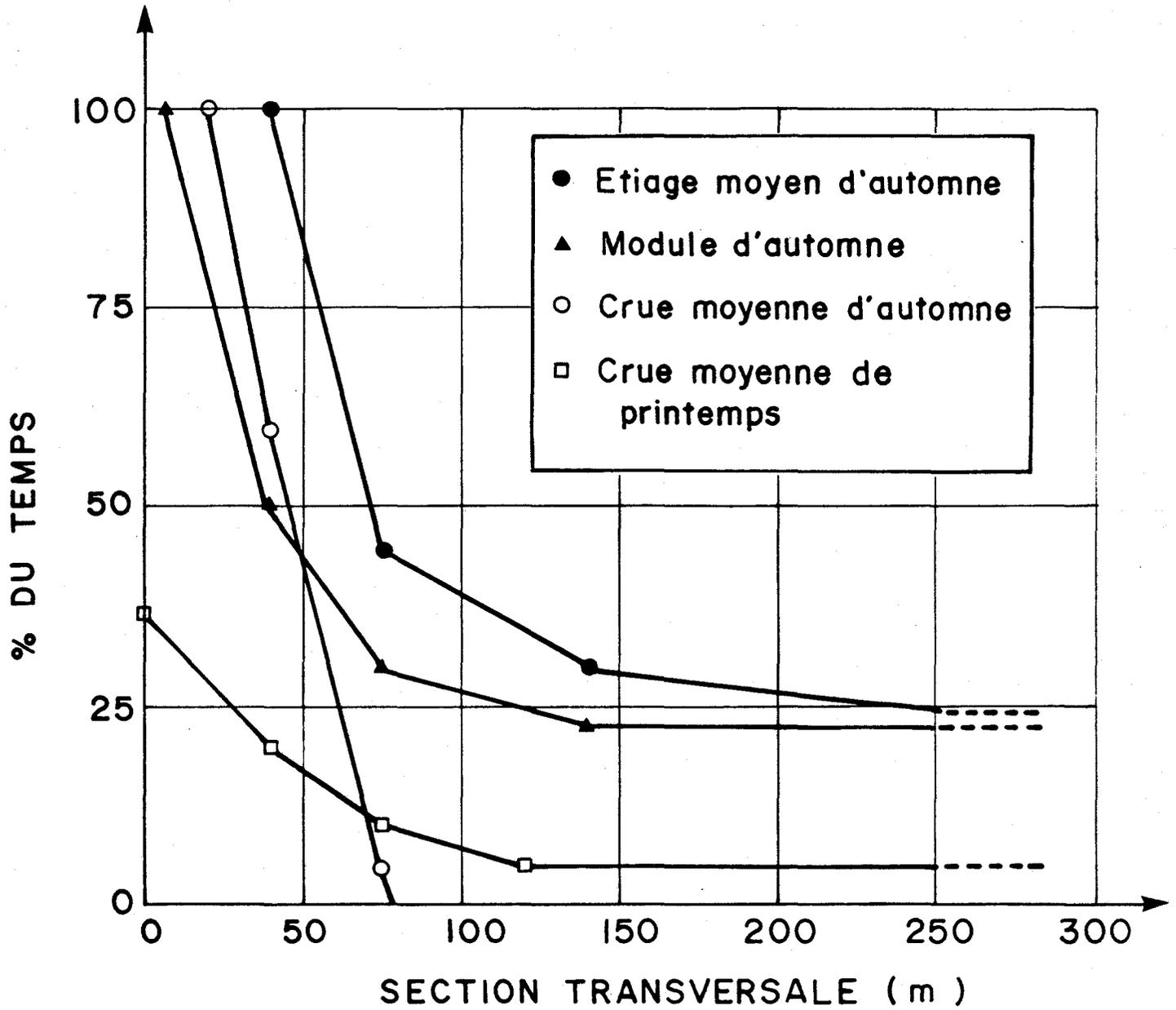
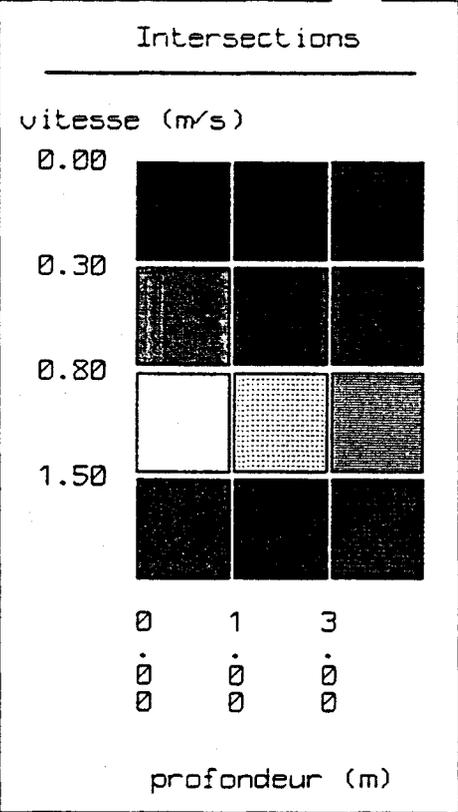
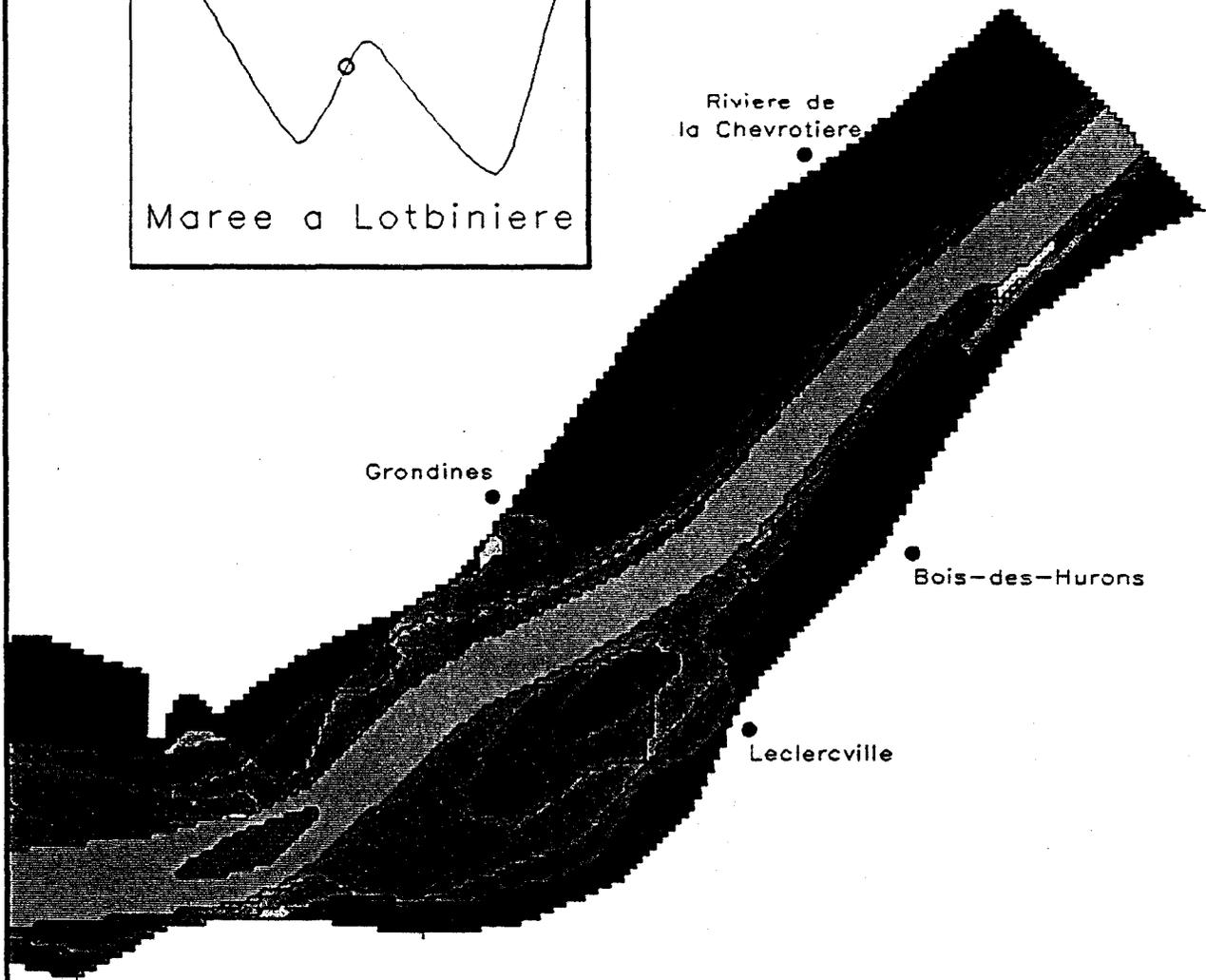
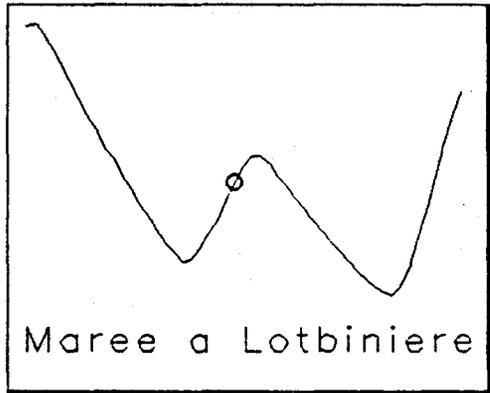


Figure 6.12 Section transversale franchissable en fonction de la durée - critère 0,3 m/s - Pointe de la Jetée Nord de l'axe Bois-des-Hurons



- 41 -

Planche Hur.A.Aut.Cru 4.2 Figure 6.13  
Bois des Hurons actuel - Crue moyenne d'automne

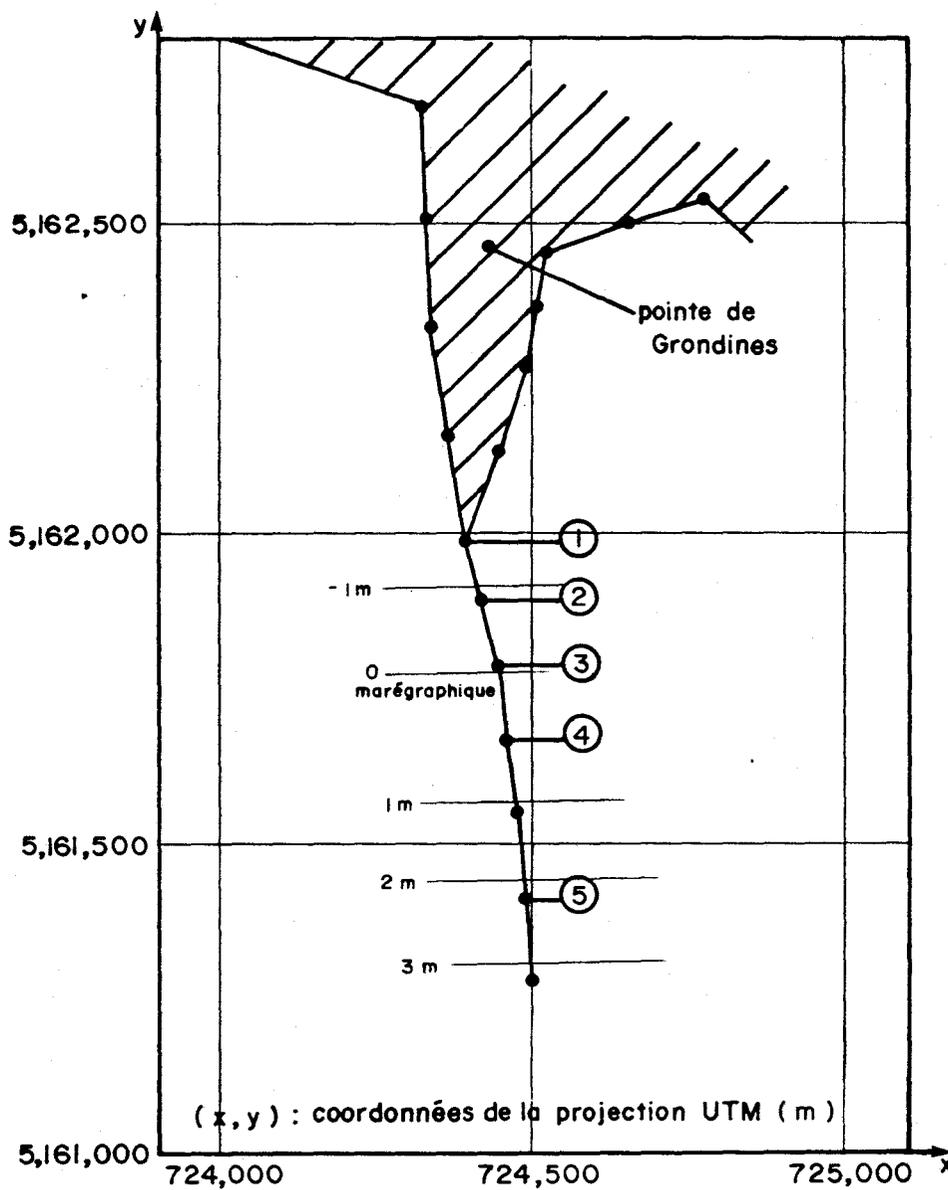
Hydro-Quebec  
Direction  
Environnement

**TAO**  
Simulations

CRANI  
INRS-eau  
Dept. Genie civil  
Universite Laval

Projet Poulamon

Hygraf 2.0



Légende

- Les points 1 à 5 sont situés respectivement à 0, 100, 210, 330 et 570 m de la pointe tel que définie dans le modèle.

Figure 6.14: Plan de localisation des noeuds du modèle à la pointe de Grondines

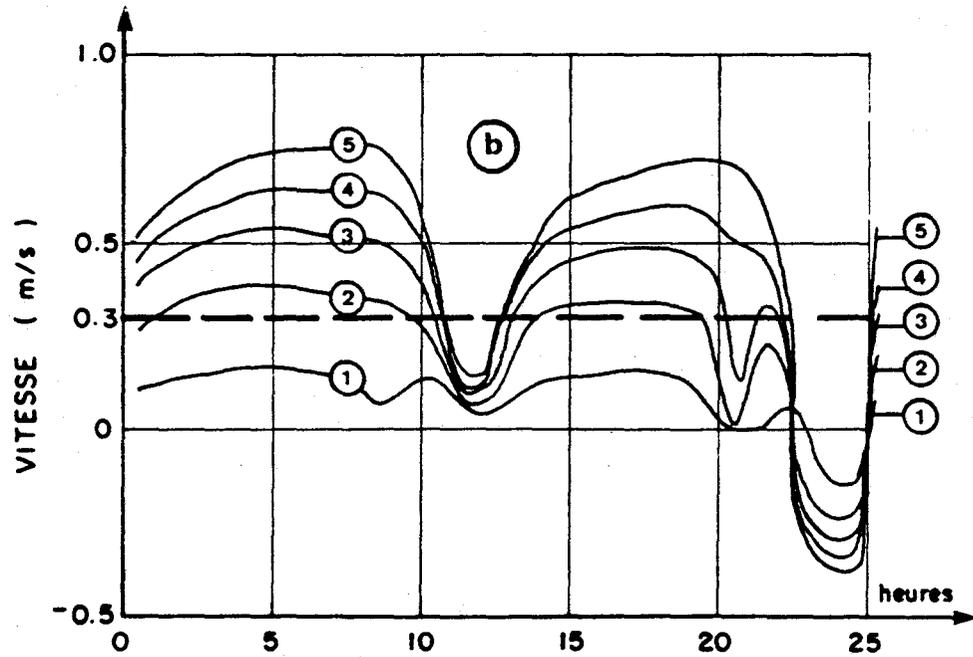
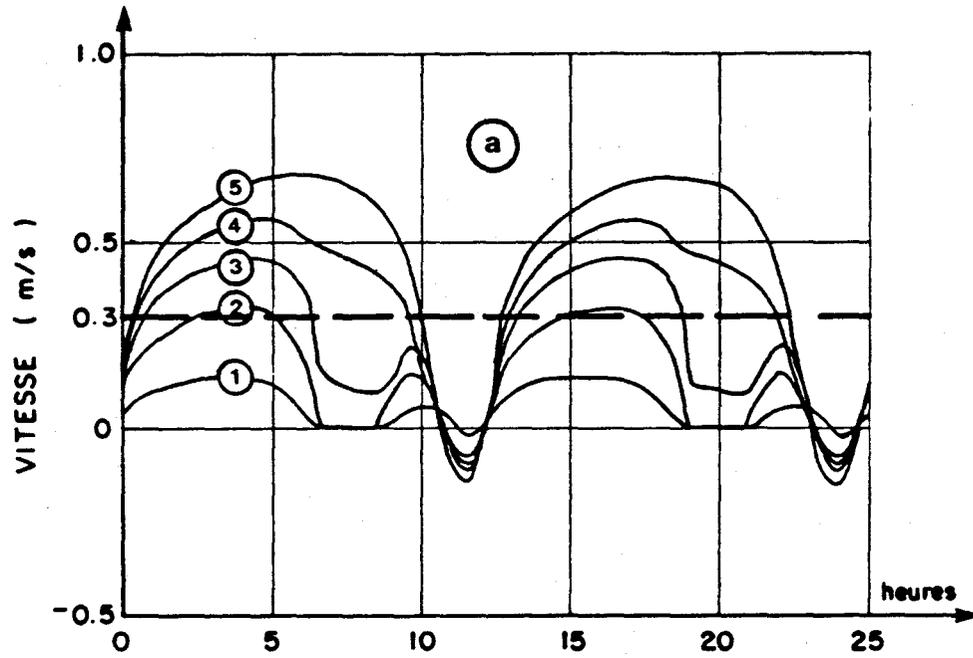


Figure 6.15: Conditions de vitesse à la Pointe de Grondines - a: étiage moyen d'automne; b: module d'automne (voir la figure 6.14 pour la localisation des points 1 à 5).

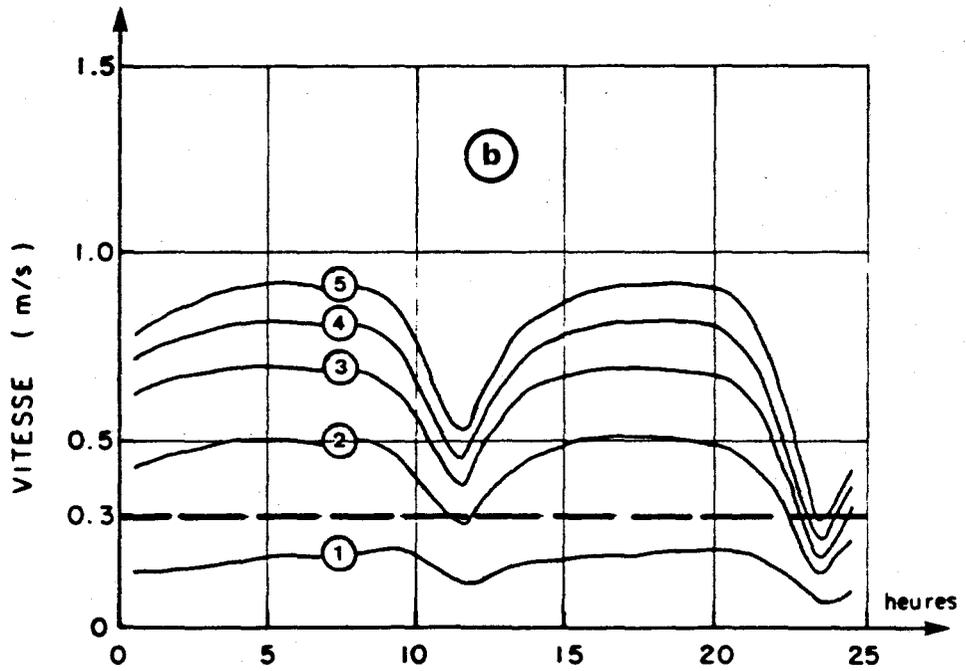
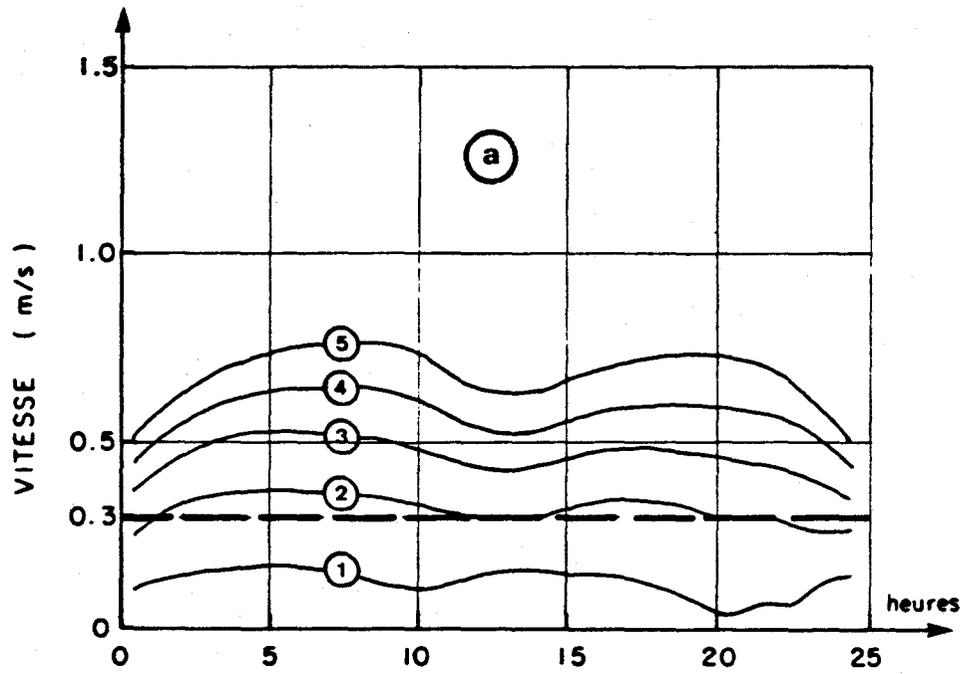


Figure 6.16: Conditions de vitesse à la Pointe de Grondines - a: crue moyenne d'automne; b: crue moyenne de printemps

au quai de Grondines (près du lieu désigné Grondines sur l'illustration) et à la pointe de Grondines (à gauche de l'illustration), on observe des conditions beaucoup moins favorables. Ce sont les conditions de la pointe de Grondines (figure 6.14) que nous avons retenues pour fins de comparaison ultime des courants à survenir à la pointe de la jetée nord.

Nous avons porté en graphique les vitesses calculées en fonction du temps pour chacun des états de référence (figures 6.15 et 6.18) de l'étude. Cinq noeuds nuérotés de 1 à 5 et situés respectivement à 0, 100, 210, 330 et 570 m de la pointe (celle définie pour le modèle) ont été retenus pour illustration.

L'analyse des sections transversales franchissables en fonction du temps a été menée de la même manière que précédemment. La figure 6.19 nous montre les résultats obtenus pour l'ensemble des états.

L'analyse des courbes de la figure 6.19 nous révèle que lors des forts débits, des conditions de passage favorables en durée (100% du temps) sont maintenues à la proximité de la pointe (25 à 50 m). Très vite cependant, les conditions de courant deviennent défavorables la plupart du temps (85%) dès qu'on s'éloigne à plus de 100 m de la pointe. À 200 m de celle-ci, il n'y a même plus de moment du tout où le courant tomberait à moins de 0,3 m/s.

Pour les débits d'étiage et module, les conditions de découverture de la batture réduisent la section disponible pendant un certain temps; c'est pourquoi, vis-à-vis du noeud 1, les conditions ne peuvent être considérées favorables que 80-85% du temps. Cependant, les conditions sont favorables plus longtemps et sur une plus grande section que lors des crues.

Quand on compare ces conditions avec celles de la pointe de la jetée projetée (figure 6.12), on observe des tendances générales analogues. Quelques différences se manifestent cependant. En effet, on voit de nouveau le comportement singulier de la crue d'automne lequel est

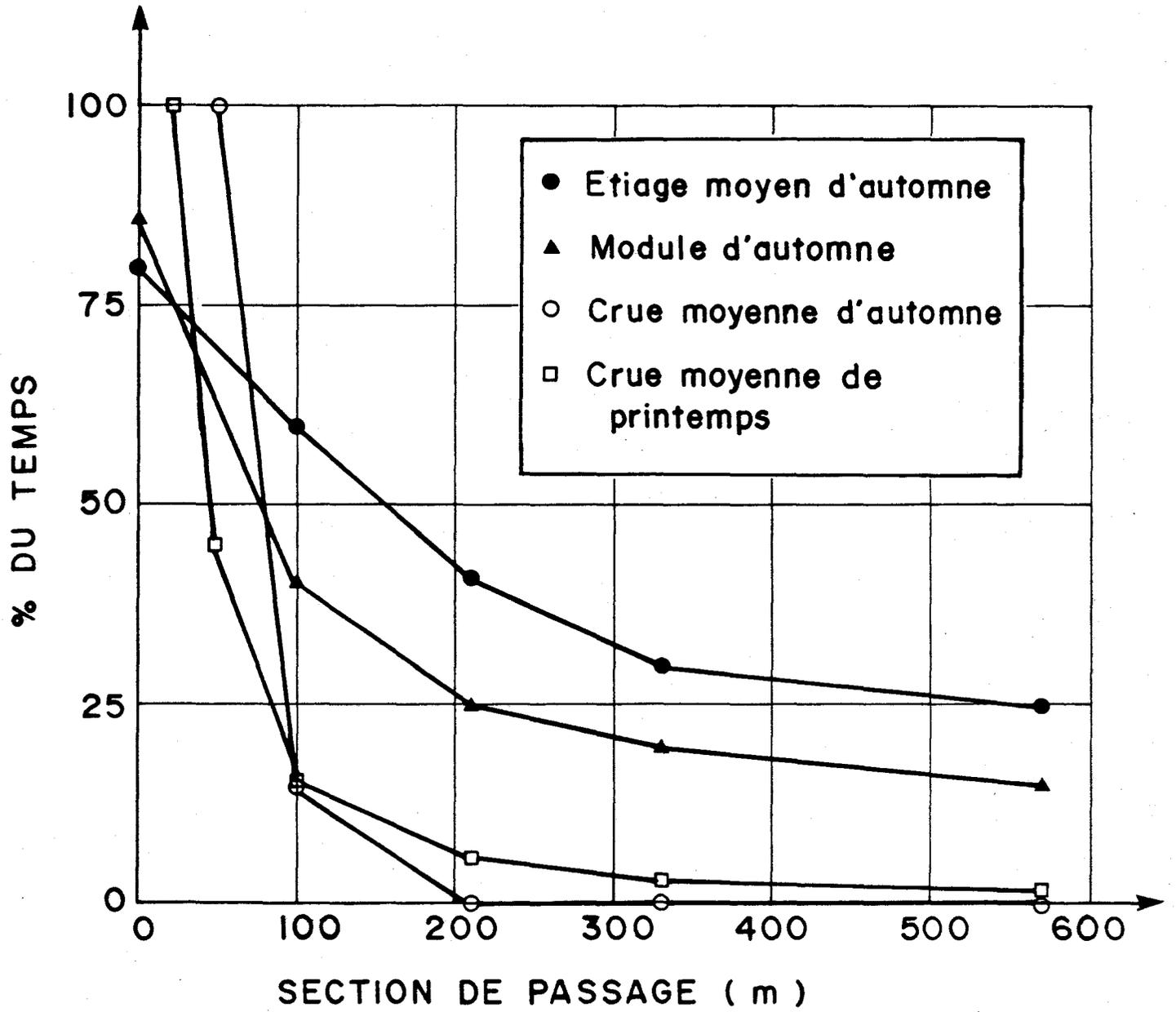


Figure 6.19: Section de passage en fonction du temps - critère 0,3 m/s -  
Pointe de Grondines

attribuable, nous l'avons vu, à une marée de plus faible amplitude relativement. Cet état ne bénéficie pas des effets de ralentissement important voire, d'inversion dont les autres états sont marqués.

À durée égale, on observe en général une section de passage favorable réduite de moitié à la pointe de la jetée comparée à celle de la pointe de Grondines.

On trouvera au Tableau 6.1 quelques exemples chiffrés de comparaison entre les deux pointes.

Dans les conditions les plus sévères observables pendant les débits de crue d'automne, on constate un écart général entre les deux sites variant entre 30 m à 60 m.

Ce constat nous servira de point d'appui pour recommander ultérieurement des mesures de mitigation visant à maintenir dans l'axe Bois-des-Hurons des conditions minimales de passage analogues à celles de la pointe de Grondines.

Tableau 6.1: Comparaison des conditions natatoires favorables (< 0,3 m/s) aux pointes de Grondines et de la jetée nord

ÉTIAGE MOYEN D'AUTOMNE				
LIEU	% du temps			
	30	40	50	-
POINTE GRONDINES	350 m	200 m	150 m	
POINTE DE LA JETÉE NORD	175 m	90 m	70 m	
DIFFÉRENCE (m)	175 m	110 m	80 m	

MODULE D'AUTOMNE				
LIEU	% du temps			
	20	30	40	50
POINTE GRONDINES	325 m	150 m	100 m	75 m
POINTE DE LA JETÉE NORD	200 m	75 m	60 m	40 m
DIFFÉRENCE (m)	125 m	75 m	40 m	35 m

CRUE MOYENNE D'AUTOMNE				
LIEU	% du temps			
	10	20	50	100
POINTE GRONDINES	130 m	95 m	75 m	50 m
POINTE DE LA JETÉE NORD	70 m	60 m	45 m	20 m
DIFFÉRENCE (m)	60 m	35 m	30 m	30 m

## 7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### Conclusions relatives à la démarche

La présente étude a permis de réaliser une application intégrée et très élaborée de différentes techniques: modélisation par éléments finis, télédétection, traitement d'images, infographie et ce, dans le contexte de la protection d'une ressource biologique d'intérêt: le poulamon atlantique.

Dans le cadre de la traversée du fleuve Saint-Laurent de la ligne Radisson/Nicolet/des Cantons, un tronçon du fleuve compris entre Lotbinière et Sainte-Anne de la Pérade a été jugé comme la portion nécessaire pour appliquer judicieusement le modèle MEFLU-2.0 compte tenu du besoin de modéliser l'apport de la rivière Sainte-Anne dans le fleuve.

La phase de calibration du modèle a permis de préciser les paramètres de celui-ci et par la suite de bien reproduire l'ensemble des processus physiques importants pour la problématique: courants, propagation de la marée, débit fluvial résiduel, intrusion des eaux de la rivière Sainte-Anne dans celles du fleuve Saint-Laurent.

La phase de validation a permis de corroborer ensemble le modèle pour des ensembles indépendants de données connues relatives au débit fluvial et à la propagation de la marée.

Des conditions de références du milieu actuel ont été générées sous la forme d'une analyse de sensibilité au débit surtout mais aussi, à la marée. Quatre débits ont fait l'objet de cette analyse: l'étiage moyen, le module et la crue moyenne d'automne et la crue moyenne du printemps. Les marées simulées comprenaient la plupart du temps une succession de marnages de grande et de faible amplitudes.

Le modèle a ensuite été appliqué au même milieu tel que modifié éventuellement par le projet de traversée à Bois-des-Hurons. Du point de

vue de la structure générale des écoulements actuels du fleuve - principalement influencée (à 90-95%) par le chenal de navigation - les changements proposés, soit la construction de jetées, permettent d'extrapoler le modèle en utilisant les mêmes conditions aux limites et les mêmes paramètres que pour le milieu actuel.

Les mêmes états de référence que pour l'étude du milieu actuel ont été documentés numériquement avec MEFLU-2.0 (phase prédiction).

### Conclusions générales relatives au projet proposé

Du point de vue du comportement abiotique du fleuve quelques conclusions majeures peuvent être extraites de la présente étude, par rapport à l'hydrodynamique et au transport-diffusion.

Du point de vue hydrodynamique, l'effet de restriction des jetées est de dévier vers le chenal les écoulements qui transitent actuellement sur les estrans dans l'axe Bois-des-Hurons. Cette déviation est sensible sur une distance totale égale à deux fois la longueur des jetées centrée sur celle-ci. Les débits impliqués sont de l'ordre de 0-5% dépendant de la phase de la marée et du débit fluvial résiduel. Cet effet est relativement minime et localisé par rapport à l'échelle d'ensemble du domaine d'étude. Cette faible proportion est attribuable à la bathymétrie du fleuve caractérisée par un chenal navigable profond de 14-15 m (par rapport au référentiel) et des estrans dont la profondeur serait plutôt de  $\pm 1,0$  m. Dans le cas présent, la fraction la plus "utile" de la section d'estran, celle comprise entre les extrémités des jetées et le chenal, est laissée libre pour l'écoulement. Dans cette zone, la vitesse de l'écoulement est augmentée dans une proportion de l'ordre de 10% par comparaison avec les conditions actuelles.

Sur la moitié de la zone de déviation de l'écoulement, celle comprise dans un triangle formé par une jetée, le littoral et un segment de droite qui les joint, l'écoulement est considérablement ralenti ne laissant subsister près de la jetée qu'un courant transversal de flot et de jusant.

Du côté sud de l'axe Bois-des-Hurons, les simulations ont permis de mettre en évidence une structure tourbillonnaire se produisant pendant le jusant à l'aval de la jetée en particulier lors des débits de crue. Il s'agit de structures relativement communes dans le fleuve en particulier lors des périodes de retournement du courant au début du flot ou du jusant. Ces tourbillons se produisent à l'échelle des structures physiques (jetée sud, élargissement du chenal à l'aval ou à l'amont de Grondines) qui y contribuent. Il est à noter que ces tourbillons induisent des courants relativement faibles (typiquement 0-0,15 m/s) et peu porteurs d'énergie.

Il n'a pas été possible de mettre en évidence de tourbillon stationnaire à grande échelle du côté de la jetée nord. Tout au plus, retrouve-t-on à l'occasion, des structures transitoires de courte durée (typiquement 0,5 heure) qu'on peut associer à des phases de retournement du courant.

Du point de vue de l'intrusion de la rivière Sainte-Anne dans le fleuve Saint-Laurent, une conclusion globale va s'appliquer à la comparaison des résultats avec les jetées et sans celles-ci. Une remarque préliminaire doit d'abord être faite. L'intrusion des eaux de la rivière Sainte-Anne est un phénomène extrêmement contrasté en raison de la grande variabilité des facteurs en cause: hydraulicité saisonnière de la rivière, périodicité de la marée, etc.

On ne doit donc pas s'attendre à ce que cette étude de sensibilité du transport diffusion aux facteurs mentionnés précédemment, nous permette de percevoir en détail toute la variabilité combinée des divers facteurs. Quoi qu'il en soit, les débits qui ont fait l'objet d'analyse sont très variés et nous permettent de vérifier des conditions près des extrêmes et de la moyenne des événements.

L'intérêt de l'étude réside surtout dans l'effet que procure la présence des jetées. En effet, dans la zone immédiate de la jetée nord où les écoulements sont considérablement ralentis, il s'ensuit un élargissement général de l'intrusion qui se répercute également mais de manière moins sensible vers l'amont et l'aval. Ce constat est applicable à

l'ensemble des simulations. On aura donc tendance à retrouver dans ces zones des eaux moins diluées de la rivière Sainte-Anne et plus répandues sur l'estran que dans le contexte actuel. La présence des jetées aurait en quelque sorte pour effet d'amplifier un processus déjà présent dans la région de l'axe Bois-des-Hurons, soit celui induit par la présence d'estrans à écoulement lent et susceptible de s'exonder périodiquement à marée basse. L'effet de déviation vers le chenal qui résulte des estrans est de même nature à un degré moindre que l'effet des jetées.

#### Conclusions relatives au comportement du poulamon atlantique

Comme nous l'avons vu, il a été retenu d'utiliser une approche normative pour définir un seuil de vitesse limite propice à la montaison du poulamon atlantique. Ce seuil de 0,3 m/s définit une vitesse vers l'aval que le poisson visé peut franchir en régime normal de montaison.

Ce seuil découle d'une part, des analogies génétiques qu'on peut établir avec la lotte un poisson mieux connu du point de vue du potentiel natatoire, et, d'autre part, de nombreuses mesures réalisées sur le terrain par les biologistes de G. Shooner et associés (1987).

Sans doute, le poulamon peut-il franchir de courtes distances dans des conditions plus difficiles? Mais, en absence de données minimales sur cet aspect, il a été résolu d'adopter un point de vue sécuritaire et responsable vis-à-vis de cette ressource.

De notre point de vue, le seuil natatoire de 0,3 m/s pour le poulamon atlantique doit être utilisé comme une norme qu'il importe par la suite de respecter dans toutes les phases de construction des ouvrages dans l'axe Bois-des-Hurons.

Une conclusion préliminaire serait que les conditions actuelles dans l'axe Bois-des-Hurons sont parmi les plus favorables (dans le domaine à l'étude) qu'aurait à franchir le poulamon atlantique dans sa migration vers l'estuaire de la rivière Sainte-Anne.

C'est pourquoi la comparaison des conditions actuelles à cet endroit avec celles projetées n'est pas appropriée. Il est plutôt indiqué de comparer les conditions projetées avec un site défavorable puisqu'on est assuré que le Poulamon est apte à vaincre les conditions qu'on y retrouve. Parmi les sites potentiels on compte, entre autres, le quai de Grondines et la pointe de Grondines, le premier étant sans doute le pire en raison de la proximité de zones de grandes profondeurs.

Par mesure de sécurité, c'est avec la pointe de Grondines que des comparaisons ont été faites. On conclut que les conditions de section de passage à la pointe de la jetée nord sont relativement proches de celles qu'on retrouve à la pointe de Grondines, un déficit de 30 m à 60 m subsistant cependant au désavantage de la jetée. Cette conclusion fera l'objet d'une recommandation spécifique pour les mesures de mitigation.

En ce qui concerne les zones à proximité de la jetée nord à l'amont et à l'aval, il en résulte un milieu doublement propice pour le poulamon atlantique. Premièrement, on y retrouve, comme nous l'avons vu, des eaux plus représentatives de la rivière Sainte-Anne que dans les conditions actuelles (effet d'accumulation) et deuxièmement, les conditions de courant y sont considérablement ralenties ce qui devrait s'avérer favorable au repos du poisson (facteur d'abri).

Enfin, il n'a pas été possible de mettre en évidence des structures tourbillonnaires importantes et stables dû à la présence de la jetée nord. De telles structures ont pourtant résulté des simulations du côté sud en conditions de crue. Des différences de bathymétrie et de conditions de propagation de la marée expliquent cette différence de comportement. Les états de référence pour la simulation représentant une gamme réduite des conditions possibles de marée, il n'est pas exclu qu'en certaines circonstances (niveau d'eau plus élevé) de telles structures tourbillonnaires plus stables puissent apparaître du côté nord également. Du point de vue de l'avalaison des larves du poulamon, cela pourrait alors représenter un facteur de rétention locale de celles-ci et éventuellement de prédation excessive. Nous croyons

cependant que ce risque est relativement faible car ces structures sont caractérisées par des courants très lents créant peu d'appel par rapport aux masses d'eau transitant à proximité.

#### Recommandation

Étant donné l'approche normative adopté pour le poulamon atlantique et la capacité existante de celui-ci de franchir les conditions hydrodynamiques actuelles à la pointe de Grondines, une seule recommandation nous semble appropriée:

- maintenir dans l'axe de Bois-des-Hurons (rive nord) pendant la montaison des conditions hydrodynamiques minimales analogues à celles qu'on retrouve à la pointe de Grondines en termes de distance transversale franchissable.

Il est entendu que cette mesure procède d'une attitude de prudence car il n'est pas démontré que les conditions futures seraient insurmontables pour le poulamon atlantique.