

Sciences
TD
380
A1
C132
1,4

les cahiers de centreau



CENTREAU
Centre de recherches sur l'eau

**MÉLANGE DES EAUX DOUCES
ET SALÉES
DU SAINT-LAURENT
CIRCULATION ET SALINITÉ**

Yvon OUELLET
Jacky CERCEAU



UNIVERSITÉ LAVAL
Québec, Canada

Vol. 1, No 4, juillet 1976

LES CAHIERS DE CENTREAU

LES CAHIERS DE CENTREAU constituent une collection d'études qui fait connaître les travaux des chercheurs de l'Université Laval dans le domaine de l'eau et qui s'adresse à la fois aux scientifiques et aux praticiens intéressés aux richesses naturelles et à leur conservation. Ils traitent chacun de sujets particuliers et apportent des conclusions ou des recommandations susceptibles non seulement d'augmenter les connaissances, mais de fournir aussi des solutions à de nombreux problèmes concernant la gestion et l'aménagement des ressources.

Au moyen de cette revue scientifique bimestrielle, le CENTRE DE RECHERCHES SUR L'EAU de l'Université Laval désire mettre en évidence l'importance des sciences hydriques à cette institution et promouvoir des échanges à l'échelle nationale et internationale.

Ces cahiers sont adressés gratuitement sur demande. Les textes publiés sont sous la responsabilité de leurs auteurs et demeurent leur propriété. Leur reproduction est permise à condition d'en obtenir l'autorisation expresse du directeur de CENTREAU.

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Canada

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec

Pour tout renseignement, s'adresser à:

José Llamas, Ph.D., directeur

CENTREAU

Pavillon Pouliot
Université Laval, Québec,
Canada, G1K 7P4

COMITÉ DE RÉDACTION

Analyse: Guy Moreau, D.Sc.
Documentation: Andrée Tardif, L.L.
Édition: G.-Oscar Villeneuve, Ph.D.

TD
380
A1
C132
124

MÉLANGE DES EAUX DOUCES ET SALÉES DU SAINT-LAURENT

CIRCULATION ET SALINITÉ

Yvon OUELLET

Jacky CERCEAU



Cette étude, qui fait partie du programme général du Centre de Recherches sur l'Eau de l'Université Laval, a été réalisée grâce à l'aide financière du ministère de l'Environnement du Canada. Elle a reçu la participation du Groupe Interuniversitaire de Recherches Océanographiques du Québec pour les campagnes de mesures et du Centre de Traitement de l'Information de l'Université Laval pour le développement des programmes sur ordinateur.

OUELLET, Yvon: Professeur agrégé au département de Génie civil de la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval où il est entré en fonction en 1968. Diplômé en 1964, il a par la suite obtenu sa maîtrise en 1965 et son doctorat en 1967 de cette même université. Il a également poursuivi des études post-doctorales à l'Université de Californie, Berkely, dans le domaine de l'hydraulique maritime, dont il est présentement le responsable à l'Université Laval. Membre de CENTREAU et membre adjoint du GIROQ, il est actuellement directeur adjoint du département de Génie civil.

CERCEAU, Jacky: Ingénieur diplômé de l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz en 1970 et de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (France) en 1971, il a par après agi comme assistant de recherche en hydraulique à l'Université Laval. Il a obtenu de cette institution en 1973 un diplôme de maîtrise ayant travaillé sur l'importance des conditions d'impact de la rencontre d'écoulements à surface libre. Après avoir débuté ses études en vue du doctorat sur les modèles mathématiques dans les cadres de CENTREAU, il s'est affilié l'an dernier à la firme Rousseau, Sauvé, Warren et Associés pour effectuer des travaux relatifs à l'aménagement de la Baie James.

RÉSUMÉ

Le mélange des eaux douces et des eaux salées dans le Saint-Laurent a été depuis la dernière décennie l'objet d'études de plus en plus intenses. La raison en est simple en ce que l'on utilise de plus en plus l'estuaire du Saint-Laurent pour diverses fins et en particulier pour l'alimentation en eau potable et le rejet des eaux usées.

Dans ce contexte, les mécanismes qui régissent le mélange des eaux douces et des eaux salées revêtent une importance première en ce sens que les phénomènes connexes tels que la sédimentation et la pollution en dépendent. La circulation qui est le facteur qui a une influence prépondérante sur le mélange des eaux douces et salées régit, en fait, l'évolution des autres phénomènes.

Contrairement à la majorité des estuaires, on retrouve dans l'estuaire du Saint-Laurent à la fois les trois types de mélange à savoir: stratifié, partiellement mélangé et bien mélangé. Toutefois, ces conditions varient aussi dans le temps en fonction de l'importance relative de la marée et du débit d'eau douce. D'autres facteurs tels que la force de Coriolis, les conditions météorologiques, la différence de densité entre l'eau douce et l'eau salée apportent certaines modifications.

Pour décrire le mélange des eaux douces et salées, les modèles mathématiques s'avèrent jusqu'à présent comme l'outil le plus versatile. Toutefois, la technologie actuelle est bien établie si on s'en tient au phénomène bidimensionnel. Il est à prévoir que dans un avenir rapproché, la description tridimensionnelle à l'aide des méthodes numériques sera aussi bien établie.

La simulation du processus de mélange est obtenue à partir de l'équation de dispersion-convection. Cependant, la circulation qui règne dans l'estuaire est une condition nécessaire à l'opération de cette équation et est établie à partir des équations du mouvement. Les deux modèles "hydrodynamique" et de "transport" sont donc complémentaires pour ce genre d'étude.

Les résultats obtenus à l'aide d'un modèle bidimensionnel sont valables si l'on considère une description générale du phénomène. Toutefois, dans la partie aval de la zone de mélange où l'effet de stratification se fait de plus en plus sentir, seul un recours à une description tridimensionnelle donnerait des résultats plus complets.

ABSTRACT

The mixing zone, that is the interpenetration of salt and fresh water, is an area on which many researchers and scientists have spent some time during the last decades due to its importance in the human environment. The use of these waterways as a source of water and for waste water disposal have made necessary the knowledge of this area.

The intrusion of salt water into the lower portions of tidal estuaries is of the greatest interest to those who are called upon to modify the flow regime of estuaries for different purposes. The sedimentation and pollution phenomena, which are affected by the type of mixing, are then responsible for the quality of this environment.

Unlike most of the estuaries, the three types salinity intrusion, that is the stratified, partially mixed and well mixed conditions, are met in the St. Lawrence Estuary. However, the character of the mixing and dispersion depends upon the stage of the tide and the fresh water discharge. Other factors such as the Coriolis force, the wind stresses, the relative density of fresh and salt water are called upon to modify the mixing process.

The mixing of salt and fresh water is presently best described by the use of mathematical models. Two-dimensional mathematical models are up-to-date and can be used with confidence. On the other hand, the day is not so far when we are going to see the three-dimensional numerical models working in about the same fashion.

The convective-dispersion equation is the one used to describe the mixing process of conservative substance. For the use of this equation, it is necessary to know the circulation which exists in the estuary. Such a circulation is obtained from the solution of momentum and continuity equations applied to the present problem. The two models are then complementary.

The results obtained from a two-dimensional numerical model of the St. Lawrence Estuary are in general valid for a global description of the phenomenon being studied. However, in the downstream part of the mixing zone, the stratification effect is more and more important and the recourse to a three-dimensional model would be necessary for its more complete description.

TABLE DES MATIÈRES

I.	<u>CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES ESTUAIRES</u>	1
1.1	Généralités	1
1.2	Définition des estuaires	2
1.3	Circulation dans les estuaires	3
1.3.1	Caractéristiques de l'estuaire stratifié	4
1.3.2	Caractéristiques de l'estuaire partiellement mélangé	6
1.3.3	Caractéristiques de l'estuaire bien mélangé	8
1.3.4	Rapport de mélange	10
1.4	Influence du mélange sur les autres paramètres	11
II.	<u>L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT</u>	14
2.1	Généralités	14
2.2	Dénomination des composantes de l'estuaire du Saint-Laurent	14
2.3	Caractéristiques physiques et hydrographie de l'estuaire moyen	17
III.	<u>RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE</u>	24
3.1	Généralités	24
3.2	Modèles mathématiques de l'estuaire du Saint-Laurent	29
IV.	<u>MODÈLES MATHÉMATIQUES</u>	33
4.1	Modèle hydrodynamique	33
	Conditions aux limites - Conditions initiales - Conditions de stabilité - Résultats et leur interprétation	37
4.2	Modèle de transport	40
	Modèle numérique - Conditions aux limites - Conditions initiales - Résultats et leur interprétation	45
	CONCLUSIONS	51
	RÉFÉRENCES	54
	ANNEXE	59

MÉLANGE DES EAUX DOUCES ET SALÉES DU SAINT-LAURENT

CIRCULATION ET SALINITÉ

I. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES ESTUAIRES

1.1 Généralités

Depuis quelques années, les estuaires font l'objet d'études de plus en plus approfondies. L'importance économique qu'ils ont prise explique cet intérêt et les nombreuses recherches qui ont suivi. La compréhension des phénomènes estuariens a également été facilitée par l'utilisation de méthodes numériques. Ainsi, l'apparition de modèles mathématiques tridimensionnels, que les capacités de calcul des nouveaux ordinateurs ont rendu possible, vient compléter les connaissances acquises par des mesures en nature ou par des études sur modèles réduits.

L'estuaire représente une zone de transition entre l'eau douce à l'amont et le milieu maritime à l'aval. Le passage d'un milieu à un autre s'accompagne d'un certain nombre de réarrangements dont certains sont très particuliers.

Parmi ceux-ci, il faut citer le comportement des par-

ticules en suspension qui, en général, se trouvent en plus grandes concentrations dans la région à salinité variable, où elles forment un bouchon de turbidité sous le double effet des gradients de salinité et des courants régis par les marées.

Dans certaines zones, des dépôts peuvent se produire à une vitesse telle que des dragages sont nécessaires pour maintenir les chenaux maritimes à une profondeur suffisante. C'est pour cette raison principale que la compréhension du comportement des suspensions dans les estuaires est si importante économiquement.

1.2 Définition des estuaires

L'estuaire peut se définir comme la partie aval d'un fleuve, soumise à la propagation de la marée (Emery et Stevenson, 1957).

Il fournit aux hommes des ressources souvent indispensables parmi lesquelles la récréation, la pêche et la navigation. Il sert également au rejet des eaux usées industrielles et domestiques. Au-delà de certains seuils, des incompatibilités peuvent se manifester entre ces différentes utilisations, créant ainsi les problèmes que les chercheurs commencent juste à percevoir.

L'écoulement particulièrement complexe établi dans les estuaires par l'influence des marées est maintenant beaucoup mieux connu grâce aux travaux de plusieurs chercheurs. Quant à la circulation globale des eaux, certaines schématisations ont été proposées depuis longtemps. Simmons en 1954 a publié une classification très générale, basée sur l'observation de cas réels et permettant une première approche de l'environnement estuarien. Cette classification sera maintenant présentée.

1.3 Circulation dans les estuaires

Le facteur qui a une influence prépondérante sur le mélange des eaux douces et des eaux salées dans un estuaire est l'importance relative des débits dus à la marée et des débits dus à l'écoulement des eaux douces. De plus, en ce qui concerne les conditions de surface, la direction et l'intensité du vent peuvent jouer un grand rôle, par l'action de la houle en particulier.

D'autres facteurs interviennent également, tels la forme de l'estuaire, la force de Coriolis, la force centrifuge et la force de gravité. Dans ce dernier cas, la différence de densité entre les eaux qui se mélangent doit être prise en considération (Ippen, 1966).

En ne considérant que les volumes introduits dans

l'estuaire par la marée et l'écoulement d'eau douce, Simmons (1954) définit trois types de mélange entre les deux eaux en présence: l'estuaire peut être stratifié, partiellement mélangé ou encore bien mélangé. Ces différences sont importantes car elles conduisent à des circulations globales qui influencent différemment le transport des particules solides.

1.3.1 Caractéristiques de l'estuaire stratifié (figure 1.1)

Dans un estuaire stratifié, le profil de l'écoulement montre deux parties nettement séparées. La longueur de pénétration du coin salé dans l'estuaire est une fonction de la profondeur d'eau, du débit d'eau douce et de la différence de densité des eaux. En amont du coin salé, la direction des vitesses le long d'une verticale est la même en tout temps. En aval du coin salé, la direction des vitesses s'inverse en passant par une valeur nulle. Le mélange étant très faible en dehors de la zone d'interface, la salinité observée dans la couche salée ("coin salé") est pratiquement celle de l'océan. Ce type de mélange se rencontre lorsque le débit d'eau douce est important et que les marées sont faibles. Lorsque ces conditions sont réunies, le vent peut avoir une influence non négligeable sur l'écoulement par son action sur la couche de surface.

Entre la couche inférieure salée et la couche supérieure d'eau douce, la diffusion est négligeable. L'inter-

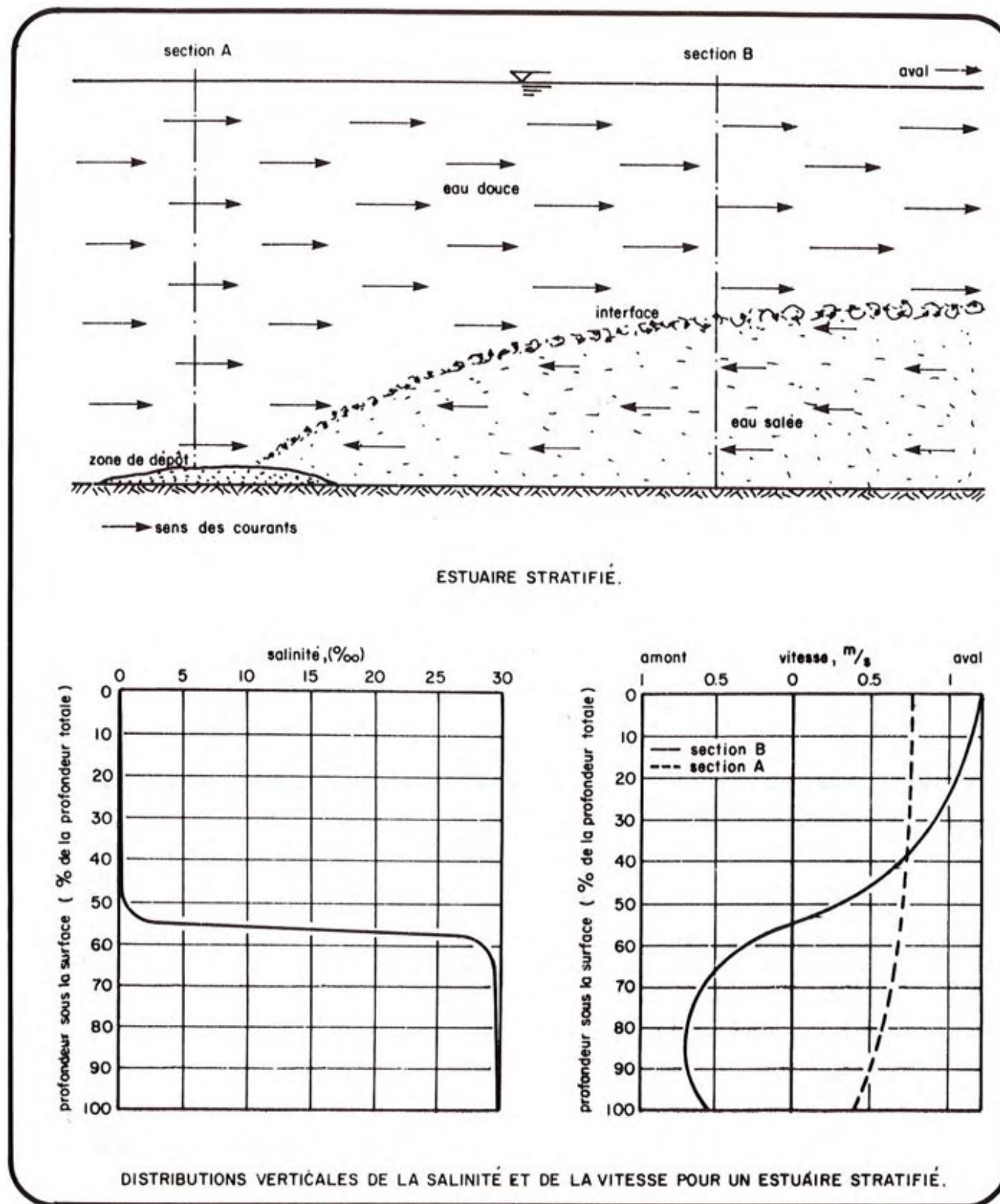


Fig. 1.1 — REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES D'UN ESTUAIRE STRATIFIÉ.

action des deux couches se limite à des courants de gravité intenses qui se produisent idéalement de façon constante le long de toute l'intrusion. Toute l'eau salée entrant dans l'estuaire redescend ensuite au-dessus de l'interface. Les vitesses près du fond sont élevées; celles en surface peuvent l'être encore plus. L'action de la marée déplace seulement la position du coin salé d'avant en arrière. Comparée aux autres types de mélange pouvant se produire, l'intrusion salée dans ce cas est celle qui remonte le plus haut dans l'estuaire. La superposition des courants de marée et de gravité produit des vitesses maximales en surface lors du reflux et des vitesses maximales au fond lors du flux. Les variations sinusoïdales des vitesses sont fortement déformées entre la surface et le fond, en grandeur comme en durée. Près du fond, les vitesses sont en moyenne nettement dirigées vers l'amont.

1.3.2 Caractéristiques de l'estuaire partiellement mélangé (figure 1.2)

Dans un estuaire partiellement mélangé, les courants de marée produisent un mélange plus intense de l'eau douce et de l'eau salée, et il est nécessaire de comparer les vitesses pour distinguer les deux couches séparées par une interface. Ce dernier est beaucoup moins marqué que dans le cas de l'estuaire stratifié, la salinité augmentant régulièrement de la surface au fond. Contrairement à ce qui se produit dans le cas stratifié, la salinité varie le long de

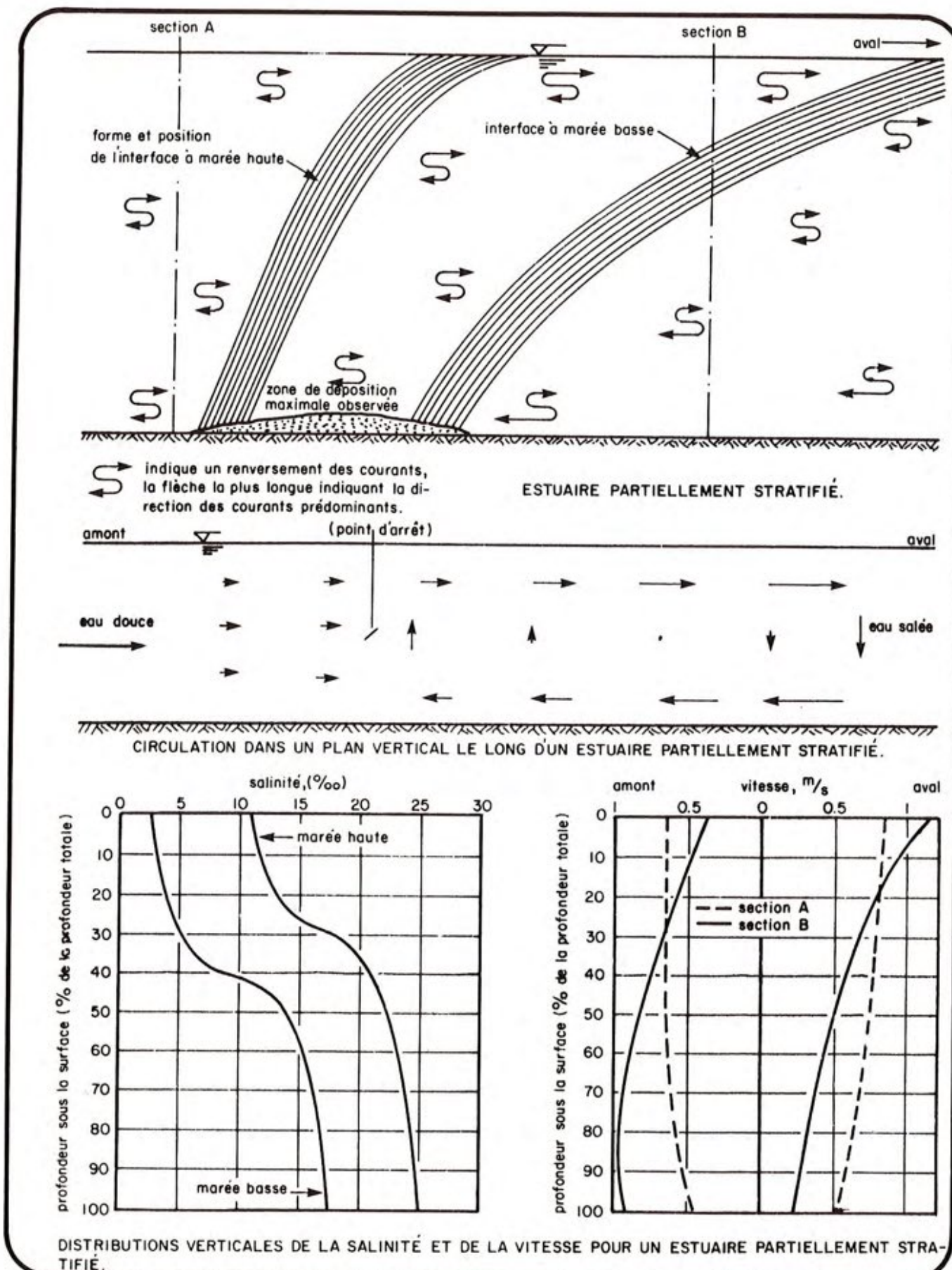


Fig. 1.2—REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES D'UN ESTUAIRE PARTIELLEMENT MÉLANGÉ.

l'estuaire, avançant et reculant avec la marée. A partir de recherches sur modèle, Harleman et Ippen (1967) ont montré qu'en plus des vitesses moyennes dirigées vers l'aval en surface et vers l'amont au fond, il existe des courants verticaux dirigés de bas en haut en amont de l'estuaire et pointés vers le bas en aval de l'estuaire (figure 1.2). Ces courants verticaux provoquent un effet qui vient s'ajouter à la diffusion turbulente pour expliquer la dilution progressive de l'eau salée du fond qui se dirige vers l'amont. D'autre part, ce phénomène facilite la recirculation des sédiments qui se retrouvent ainsi bloqués dans cette zone, où très souvent un bouchon de turbidité est observé.

1.3.3 Caractéristiques de l'estuaire bien mélangé (figure 1.3)

Si les courants dus aux forces de marée sont suffisamment importants comparés aux courants d'eau douce pour que le mélange vertical soit intense, les variations de salinité suivant une verticale sont faibles et l'estuaire est du type bien mélangé. On ne peut plus distinguer d'interface nettement marqué entre l'eau douce et l'eau salée. La variation longitudinale de salinité se retrouve comme dans le cas de l'estuaire partiellement mélangé.

Les courants dus aux variations de densité restent inférieurs à ceux provoqués par les marées. Les vitesses maximales ne sont pas aussi élevées que dans le cas de l'es-

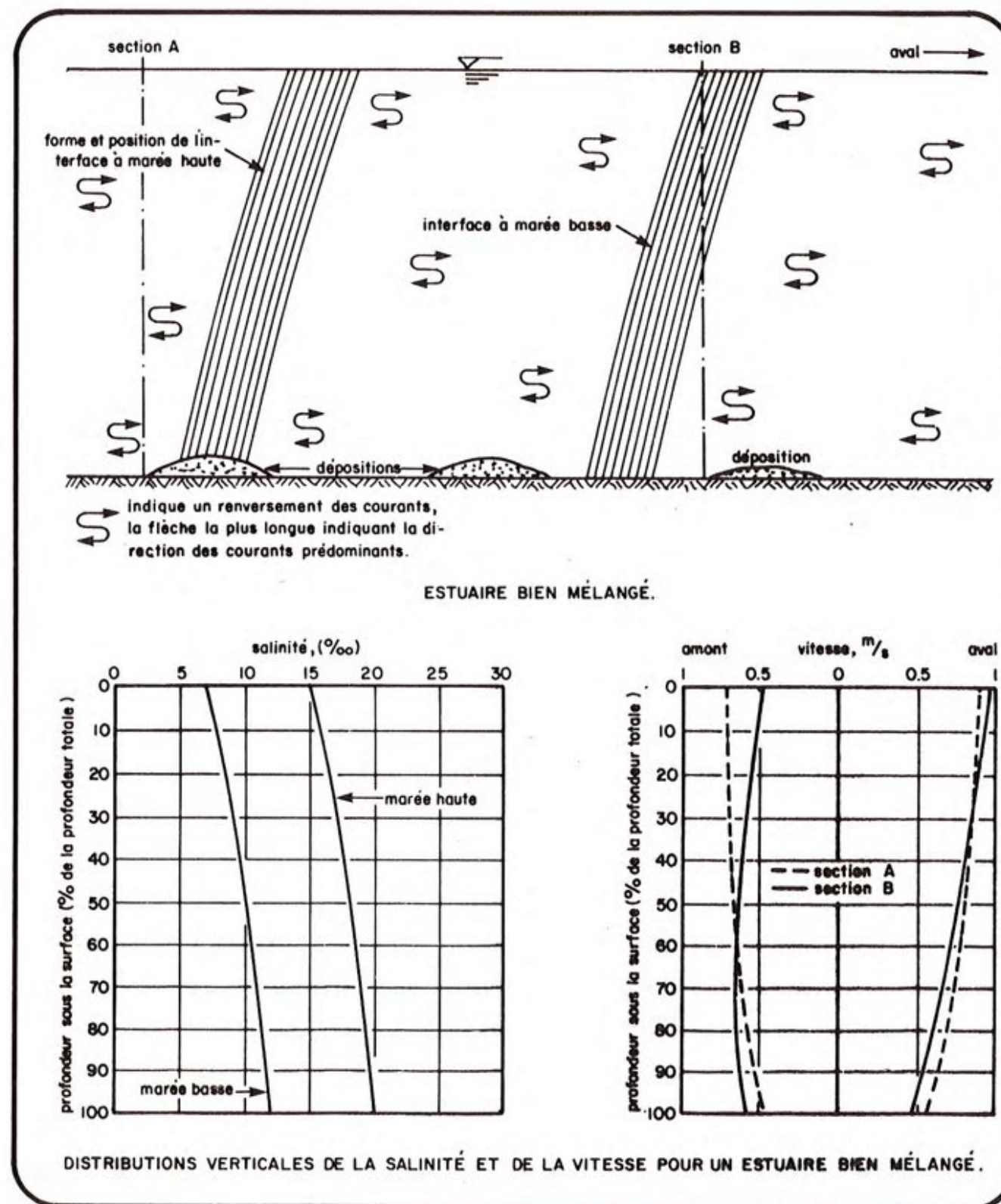


Fig. 1.3 — REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE, ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES D'UN ESTUAIRE BIEN MÉLANGÉ.

(d'après Simmons, 1954)

tuaire stratifié. Les marées produisent des courants de surface supérieurs au reflux et des courants de fond maximaux pendant le flux et leurs variations sinusoidales sont déformées comme dans le cas de l'estuaire partiellement mélangé.

1.3.4 Rapport de mélange

Les différents types de circulation estuarienne décrits précédemment peuvent être définis selon le "rapport de mélange" R des volumes d'eau douce et d'eau salée qui rentrent ou sortent simultanément dans l'estuaire. Son expression est la suivante:

$$R = \frac{\text{Volume d'eau douce entrant pendant un demi-cycle de marée}}{\text{Variation du volume d'eau salée pendant le même temps}}$$

Ainsi, pour les valeurs de R indiquées, les types d'estuaires observés seront:

$R = 1$: type stratifié

$R = 0.1$: type partiellement mélangé

$R = 0.01$: Type bien mélangé

Comme dans le calcul de R , aucun des deux paramètres considérés n'est constant au cours du temps, un estuaire peut présenter tous les états intermédiaires entre les types définis précédemment, tout comme il peut passer d'un type à un autre.

Pour le Saint-Laurent, on observe parfois une stratification marquée du chenal maritime en amont de l'île aux Coudres mais en général, dans toute la région comprise entre l'embouchure du Saguenay et l'île d'Orléans, l'estuaire varie de partiellement mélangé à bien mélangé.

1.4 Influence du mélange sur les autres paramètres

La circulation et le type de mélange qui règnent dans un estuaire ont un effet primordial sur les autres paramètres, dont celui de la sédimentation qui revêt un caractère particulier. Contrairement aux rivières, l'écoulement dans les estuaires est du type non permanent, si bien que la déposition et l'érosion alternent pendant un cycle de marée. Le transport global dépend alors des vitesses moyennes obtenues sur une période de marée. A long terme, les variations du débit d'eau douce, de l'amplitude des marées, des courants transversaux dus par exemple à l'action des vents et des vagues, provoquent des transports supplémentaires. Un certain nombre de conclusions importantes peuvent être tirées malgré la diversité des cas:

- Près du fond, les sédiments sont déplacés en moyenne vers l'amont et non vers l'aval.
- Ils s'accumulent près des zones d'avancée saline où ils forment des dépôts. Il y a également déposition lorsque la vitesse est nulle.

- L'intensité des dépôts est maximale près de l'extrémité de l'avancée salée dans les estuaires stratifiés; les dépôts seront plus dispersés dans le cas des estuaires bien mélangés (Ippen, 1966).
- Dans un estuaire stratifié, une forte sédimentation se produit au niveau du coin salé: les particules les plus lourdes, apportées au fond par le courant d'eau douce, se déposent dès que l'avancée salée est atteinte. Les particules les plus fines, transportées en suspension dans l'eau douce, sédimentent lentement. Cependant, si elles traversent l'interface, elles seront transportées vers l'amont pour finalement se déposer près de l'extrémité de l'avancée salée. La limite de l'intrusion salée devient alors une zone d'accumulation à la fois pour les sédiments en provenance de l'amont et pour ceux venant de l'aval.
- Dans un estuaire partiellement mélangé - cas rencontré le plus souvent dans la réalité - la sédimentation a lieu principalement entre les limites amont et aval de l'avancée salée. Les particules du fond se déposent lorsqu'elles atteignent la limite salée, comme dans le cas de l'estuaire stratifié. Les particules fines peuvent avancer très loin dans l'estuaire avant de pénétrer dans la couche inférieure dont la vitesse moyenne est dirigée vers l'amont. Alors, elles sont de nouveau retransportées vers la limite de salinité amont. Les particules ne sont pas très homogènes en taille dans un tel estuaire, car la li-

mite salée se déplace sur une grande distance, ce qui provoque le mélange des sédiments de fond entre eux.

- Dans un estuaire bien mélangé, la vitesse montre des caractéristiques semblables à peu de choses près à celles rencontrées dans le type partiellement mélangé; la principale différence entre ces deux types réside dans l'importance des variations de densité. Comme dans un estuaire bien mélangé, l'influence des changements de densité sur la distribution verticale des vitesses est faible, les dépôts de sédiments ne sont donc plus reliés directement aux limites de l'avancée salée. Par contre, ils semblent plus influencés par des caractéristiques physiques telles qu'une section transversale très large ou un courant non uniforme causé par des îles et des chenaux séparés (Simmons, 1954).

Ainsi, le mode de déposition rencontré varie avec l'intensité du mélange des eaux douces et des eaux salées. Il faut rappeler que dans la réalité, les caractéristiques d'un estuaire peuvent ne correspondre à aucun des trois types définis ici, car le rapport de mélange peut prendre toutes les valeurs comprises entre le type stratifié et le type bien mélangé.

II. L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

2.1 Généralités

L'étude du cadre physique s'avère indispensable pour définir la propagation de l'onde de marée dans un estuaire. De ce phénomène dynamique dépendent la salinité observée ainsi que les courants qui sont alors non permanents. Ces deux caractéristiques jouant un rôle important sur le comportement des suspensions, il convient, pour mieux les comprendre, de définir tout d'abord les caractéristiques physiographiques de l'estuaire.

La description du cadre physique subdivisé en un certain nombre de parties est basée sur la propagation de l'onde de marée dans l'estuaire. Cette division est celle qui s'adapte le mieux à l'ensemble des problèmes évoqués dans le présent contexte.

2.2 Dénomination des composantes de l'estuaire du Saint-Laurent (figure 2.1)

Pour le Saint-Laurent, la limite supérieure d'influence des marées peut être fixée au lac Saint-Pierre en amont de Trois-Rivières, entre Québec et Montréal. Chacune des régions peut être subdivisée en deux parties nommées *inférieure* et *supérieure* en se basant sur des considérations relatives aux courants ou à la configuration géographique.

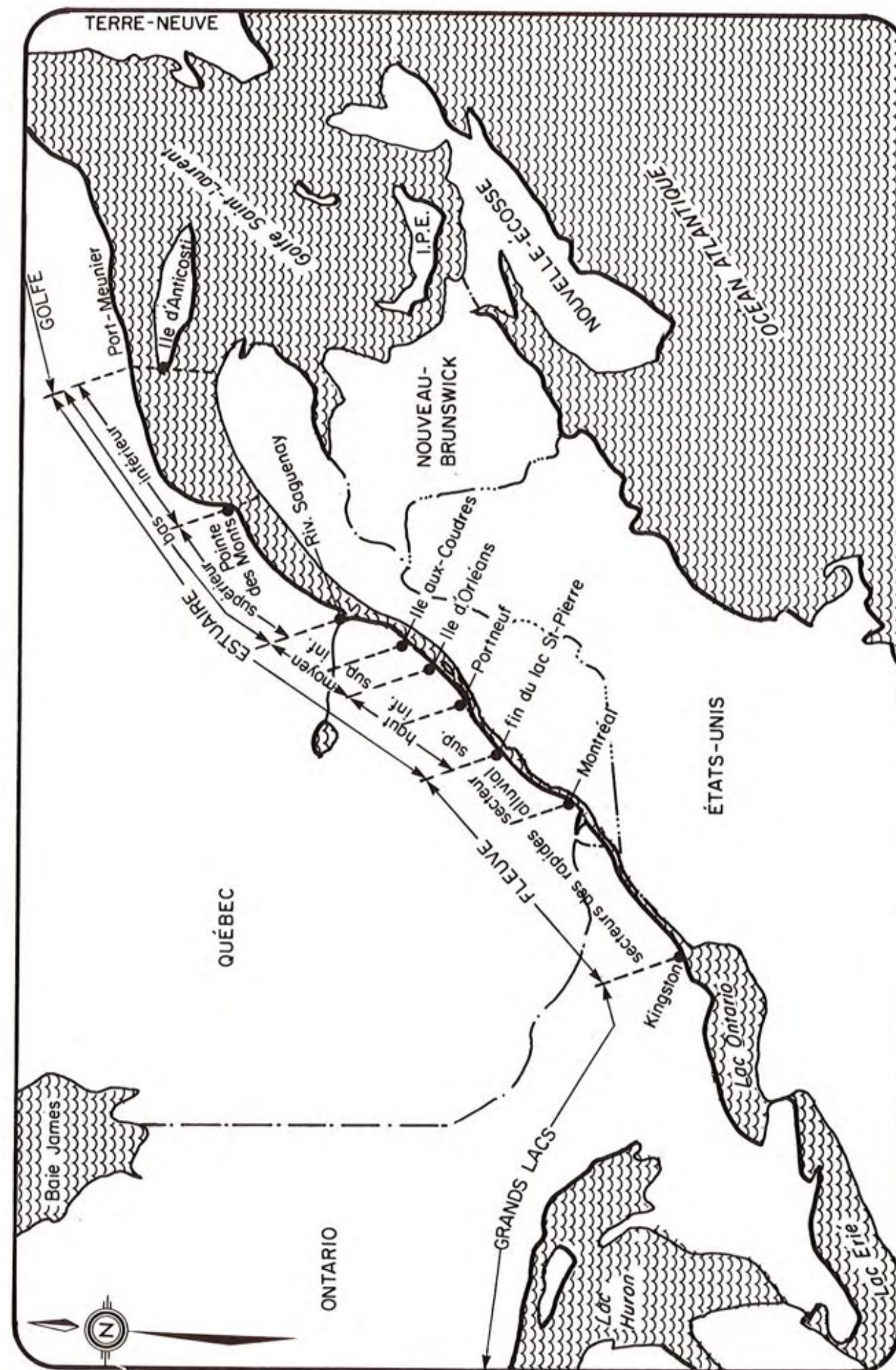


Fig.2.1 — SUBDIVISIONS DU SAINT-LAURENT.

Le haut estuaire, du lac Saint-Pierre à l'île d'Orléans, est soumis à l'influence de la marée: la variation sinusoidale est de plus en plus déformée allant de l'aval (île d'Orléans) à l'amont (lac Saint-Pierre) et on n'y observe aucune variation de salinité. Sa profondeur et sa largeur pratiquement constantes correspondent à celles du fleuve en amont du lac Saint-Pierre. L'endroit le plus loin de l'océan où les courants s'inversent encore est situé près de Portneuf. Cette limite a été choisie comme séparation entre les parties inférieure et supérieure du haut estuaire, qui correspondent respectivement à l'estuaire des eaux douces à courants réversibles et non réversibles.

L'estuaire moyen, où la marée produit des variations de salinité est constitué de la portion allant de l'île d'Orléans à l'embouchure du Saguenay. C'est dans cette région que débute l'élargissement de l'estuaire. L'île aux Coudres représente une limite possible entre les parties *supérieure* et *inférieure*, car elle sépare la zone principalement influencée par le fleuve de celle influencée surtout par les marées.

Quant au bas estuaire, il s'étend de l'embouchure du Saguenay à l'île d'Anticosti. Le golfe du Saint-Laurent commence en aval. L'élargissement se poursuit dans cette région et il devient particulièrement marqué à Pointe des Monts. Pour cette raison, la limite entre la partie supérieure et la partie inférieure du bas estuaire a été fixée à cet endroit.

L'estuaire moyen est séparé du bas estuaire par un seuil marqué où la profondeur passe de 60 m à environ 300 m qui occasionne des variations importantes dans les courants de ces deux régions. Les apports principaux d'eau douce à l'estuaire se font en un nombre limité d'endroits: à l'amont, le Saint-Laurent correspond à lui seul aux deux tiers des apports totaux à l'estuaire. Les autres affluents importants arrivent tous sur la rive Nord. Le Saguenay, qui sert de limite entre le moyen et le bas estuaire, a un débit régularisé artificiellement qui se situe aux environs de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. La Bersimis, les Outardes et la Manicouagan constituent le dernier gros apport d'eau douce au bas estuaire avec un débit total variant de 1000 à $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette étude sur l'estuaire moyen porte donc sur la région où les eaux douces rencontrent les eaux salées. Le mélange plus ou moins homogène conduit, dans le temps et sous l'influence de la marée, à de fortes variations des propriétés physico-chimiques en un même point. L'écoulement non permanent qui s'établit et qui fixe la salinité dépend fortement des caractéristiques physiques de l'estuaire que nous allons détailler.

2.3 Caractéristiques physiques et hydrographie de l'estuaire moyen (figure 2.2)

L'estuaire moyen, orienté vers le nord-nord-est, est situé sur une ligne de fracture séparant le massif des Lau-

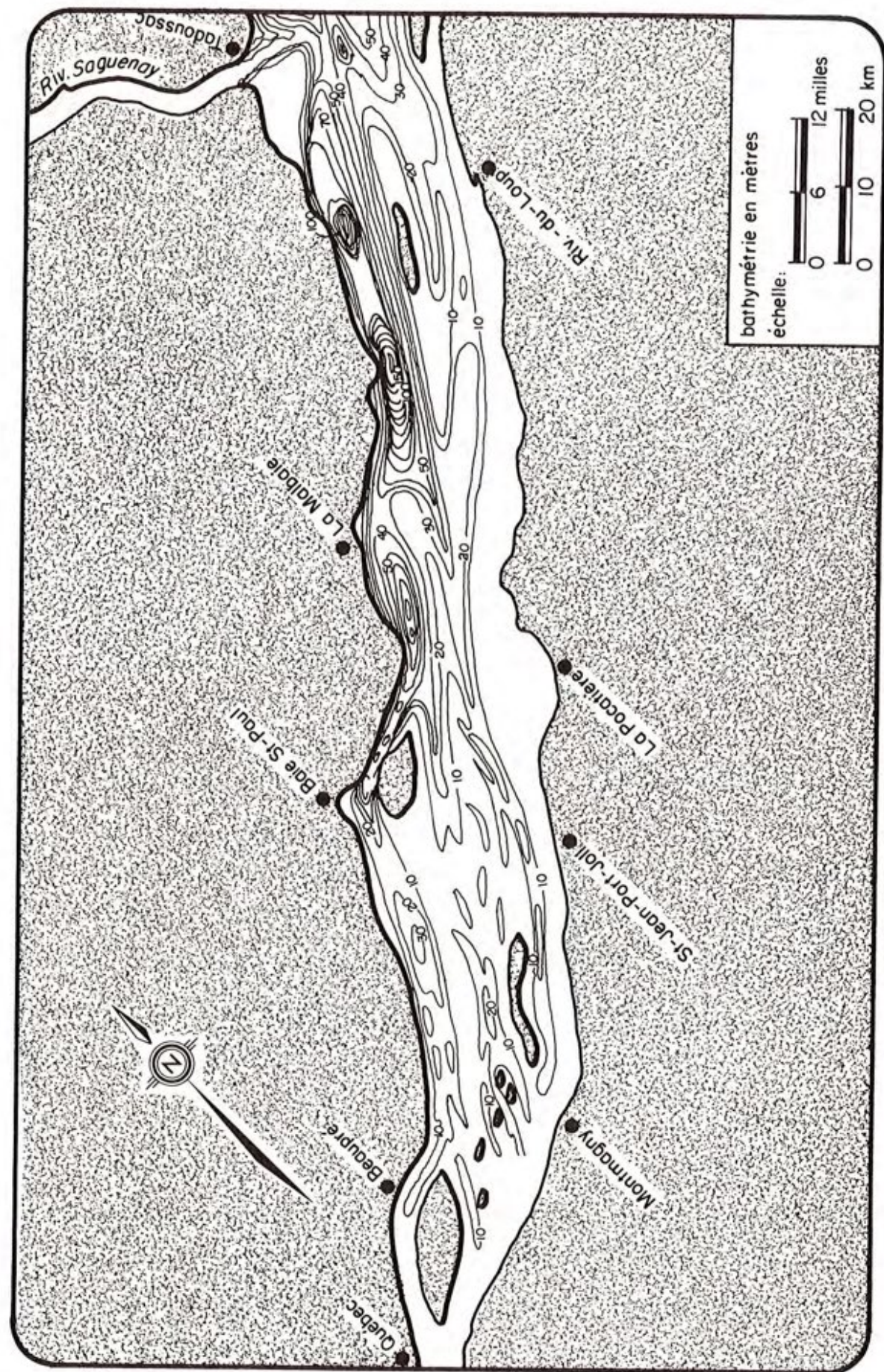


Fig. 2.2 — CARACTÉRISTIQUES DE L'ESTUAIRE MOYEN DU ST-LAURENT.

rentides au nord de celui des Appalaches du sud. La profondeur moyenne varie de 10 à 60 m environ de l'île d'Orléans au Saguenay. Après s'être évasée au niveau de l'île d'Orléans, sa largeur reste relativement constante et comprise entre 15 et 20 km.

Les plus grandes profondeurs, empruntées par le chenal maritime, sont situées près de la rive nord. La rive sud, au contraire, est longée par une plate-forme de plus faible profondeur. Un certain nombre d'îles situées au milieu du fleuve différencient nettement les courants qui s'établissent de part et d'autre. Ceci se reflète sur certains paramètres physico-chimiques des eaux, à cause de l'influence des caractéristiques physiques de l'estuaire sur la pénétration de la marée.

La surface occupée par le moyen estuaire atteint 2900 km². La masse d'eau qui l'occupe est suffisamment importante pour que des variations faibles puissent s'y faire sentir. Il en est ainsi des forces de Coriolis qui tendent à dévier le mouvement des eaux douces vers la droite et celui des eaux salées qui remontent l'estuaire vers la gauche. Ces déviations apparaissent amplifiées par la présence des îles au centre du fleuve en aval de l'île d'Orléans.

Sur une telle surface, les vents peuvent provoquer des courants de surface dont les débits peuvent atteindre des



leurs importantes. Les vagues ainsi générées conduisent à des remises possibles en suspension principalement sur la plate-forme longeant la rive sud.

Le fleuve Saint-Laurent, avec un débit moyen de 10 000 m³/s représente de très loin le tributaire principal de l'estuaire. Ses variations de débit sont modérées par la présence des Grands Lacs. Sur son bassin de drainage, les précipitations principales ont lieu sous forme de neige et les variations saisonnières sont donc dépendantes de ces deux caractéristiques.

Les particules en suspension se retrouvent à une faible concentration dans les eaux du Saint-Laurent, comparativement aux autres grands fleuves du globe, principalement à cause de la sédimentation rendue possible par la présence des Grands Lacs.

Après le débit d'eau douce, la seconde influence, qui agit sur l'hydrographie de l'estuaire, est représentée par l'onde de marée. Dans l'estuaire du Saint-Laurent, sa période couvre deux cycles (figure 2.3) et elle est donc du type semi-diurne.

L'amplitude maximale des marées à l'entrée de l'estuaire est d'environ 4 m. A cause des caractéristiques physiques de l'estuaire, elles sont pratiquement doublées quand

elles atteignent la partie amont. A cause de ceci, le mélange des eaux douces et des eaux salées est plus intense vers l'île d'Orléans que vers le Saguenay. On observe que le gradient vertical de salinité est très faible dans la partie amont de l'estuaire moyen.

Lors du mélange des deux masses d'eau en présence, la température et la salinité représentent deux paramètres dont les variations sont habituellement enregistrées, car elles rendent bien compte du phénomène.

Si la température des eaux marines reste assez stable en toute saison, celle des eaux douces, par contre, varie de quelques degrés Celsius en hiver, à plus de vingt degrés en été. Dans l'estuaire, cette différence de température provoque des variations sinusoïdales de ce paramètre au cours de la marée (figure 2.3). Du fait des écoulements préférentiels des eaux douces du côté de la rive sud et des eaux salées du côté de la rive nord, la température présente des variations transversales: en été, les eaux sont plus chaudes vers la rive sud alors qu'en hiver, elles y sont plus froides (Neu, 1970).

Enfin, le climat continental conduit à la formation de glaces qui recouvrent entièrement l'estuaire en hiver. Dans ces conditions, l'influence des vagues pour la remise en suspension des sédiments de fond est éliminée pendant tou-

te une saison. Au printemps, les glaces, lors de leurs déplacements, éliminent une partie des sédiments déposés sur les hauts fonds (Brochu, 1961).

Les variations de salinité rencontrées dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent montrent une pénétration normale de l'onde de marée jusqu'à l'île aux Coudres. L'influence du fleuve, associée aux profondeurs rencontrées transversalement, font qu'alors les isohalines se déforment, pénétrant plus profondément vers l'amont le long de la rive nord. Ces phénomènes seront traités plus en détail dans ce qui suit.

Pour des marées et des débits moyens, dans cette partie de l'estuaire du Saint-Laurent, les caractéristiques de mélange des eaux douces et des eaux salées, dont l'importance a déjà été soulignée, varient de *modérément stratifié* dans les parties les plus profondes (près de la rive nord, dans le chenal maritime) à *bien mélangé* dans les régions les moins profondes.

Au cours d'un cycle de marée, le courant moyen longeant la rive nord est dirigé vers l'amont. Celui vers la rive sud est en moyenne dirigé vers l'aval. Les différences entre les masses d'eau longeant les rives nord et sud en amont de l'île aux Coudres entraînent la génération de courants transversaux, ce qui conduit à une certaine recirculation des eaux au sein de l'estuaire.

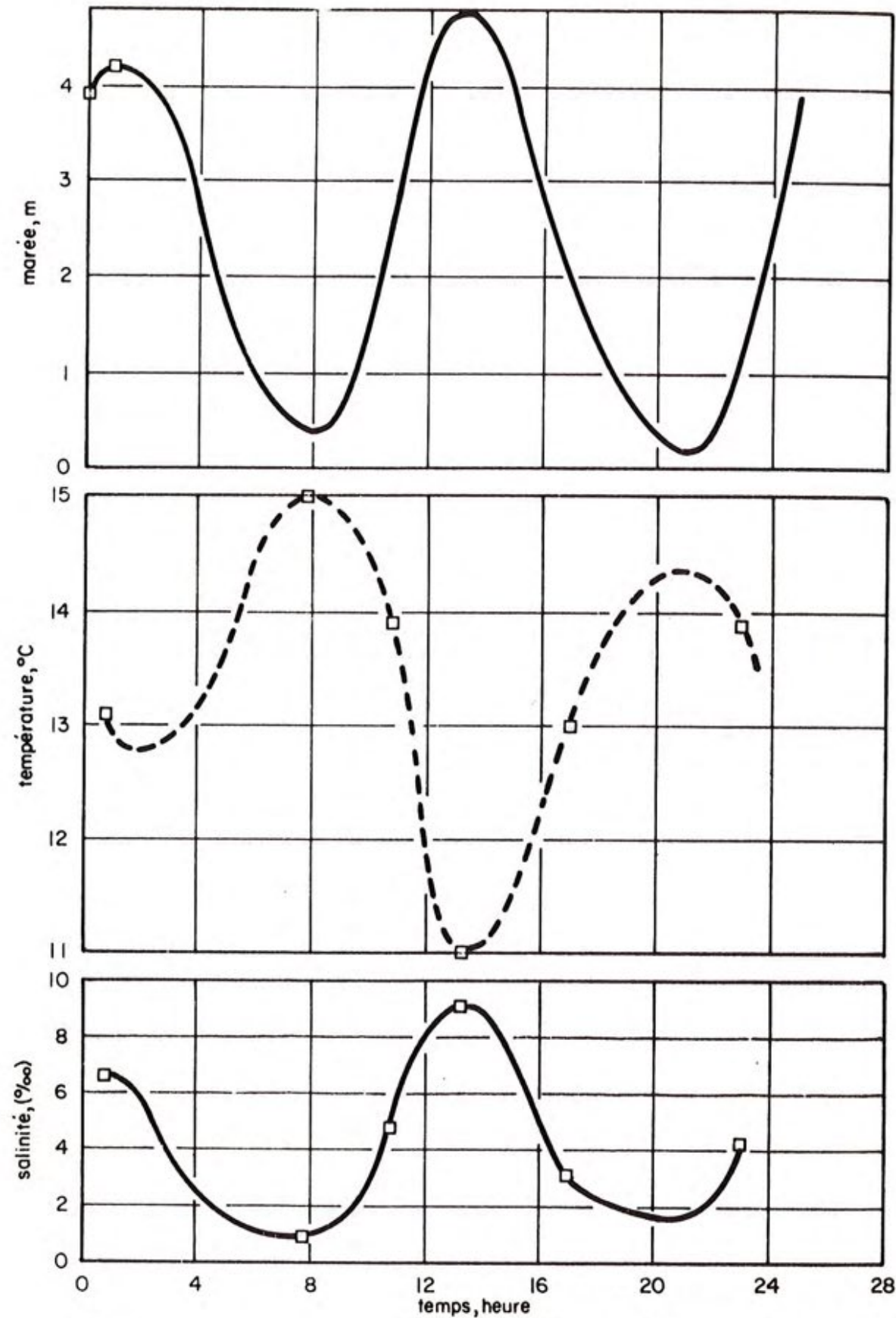


Fig. 2.3 — HAUTEUR DE LA MARÉE, TEMPÉRATURE ET SALINITÉ EN FONCTION DU TEMPS DANS LE CHENAL MARITIME AU NIVEAU DE CAP BRÛLÉ. (30/9/71 ET 1/10/71).

III. RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Généralités

Les problèmes de génie concernant l'hydrodynamique des estuaires ont reçu durant ces dernières années une attention de plus en plus croissante de la part du praticien, de l'expérimentateur et de l'analyste à cause des fonctions importantes attachées aux estuaires dans l'environnement humain. Pour s'en convaincre, il ne s'agit que de mentionner les phénomènes de diffusion et de sédimentation auxquels se rattachent plusieurs champs d'activité d'interférence de l'environnement naturel avec l'homme.

L'estuaire du Saint-Laurent n'a pas échappé à cette activité et l'intérêt manifesté par plusieurs organismes publics, universitaires et voire même privés témoigne de l'importance que revêt une connaissance plus approfondie de ce milieu. L'utilisation croissante de ce milieu pour diverses fins telles que les prises d'eau, le rejet des eaux usées, la navigation, la récréation, l'exploitation de l'énergie, le contrôle des inondations, etc... implique que les connaissances du milieu doivent être améliorées en vue d'assurer un meilleur contrôle de son équilibre écologique.

Le régime hydrodynamique qui prévaut dans l'estuaire et le mélange des eaux douces et salées sont sous-jacents à l'étude des problèmes qu'on y rencontre. Il apparaît donc

qu'il faille d'abord bien connaître les conditions hydrodynamiques et la distribution de la salinité qui règnent dans l'estuaire. Pour y arriver, on utilise différentes méthodes dont les principales sont les mesures directes, les modèles physiques et mathématiques.

Outre les mesures et à l'exception du modèle physique du Saint-Laurent construit au laboratoire d'hydraulique du Conseil National de Recherches du Canada pour le compte du Ministère des Transports (Funke, 1972), les études de la propagation de la marée et de la distribution de la salinité dans l'estuaire du Saint-Laurent ont été développées en majeure partie à l'aide de modèles mathématiques calibrés et vérifiés par des mesures en nature.

La figure 3.1 montre les principales caractéristiques du modèle physique construit à une échelle horizontale de 1:1000 et à une échelle verticale de 1:100 ce qui donne une distorsion de 10. Ce modèle a été utilisé principalement pour étudier l'influence de la construction de digues le long de l'estuaire en vue de contrôler le niveau des eaux pour fins de navigation.

Pour ce qui est des traitements mathématiques des phénomènes de propagation de la marée et de la distribution de la salinité dans les estuaires, il existe présentement deux approches principales à savoir l'approche analytique et l'approche numérique. L'approche analytique est repré-

tient en négligeant la composante verticale du mouvement, ce qui conduit à admettre que la pression est hydrostatique. Les marées dans les estuaires résultent de la variation cyclique du niveau d'eau à l'embouchure. On néglige la génération directe de la marée à l'intérieur de l'estuaire étant donné que les masses d'eau impliquées sont relativement faibles par rapport à celles des océans.

La période de la marée est généralement du type mixte avec prépondérance semi-diurne ($T = 12.42$ heures) où diurne ($T = 24.84$ heures). Quelques estuaires ont des longueurs intéressantes égales au quart ou à la demi-longueur d'onde de marée. L'amplitude de la marée est généralement faible par rapport à la profondeur d'eau qui elle-même est très faible par rapport à la longueur d'onde de marée. Ces hypothèses permettent de traiter le problème de propagation de la marée à l'aide de la théorie des ondes longues.

Les modèles mathématiques d'estuaires sont principalement élaborés en vue de mieux connaître les phénomènes de propagation des marées ainsi que la distribution de salinité, de contrôler la qualité des eaux, et d'appréhender l'influence que pourraient avoir des projets modifiant la topographie naturelle du fleuve, ou, de nouvelles conditions hydrauliques causées par des travaux de construction. En plus de permettre l'étude de l'influence d'un paramètre particulier, comme par exemple l'effet de Coriolis, le modèle sert

surtout comme cadre de base pour les autres études connexes.

3.2 Modèles mathématiques de l'estuaire du Saint-Laurent

En 1958, Ippen et Harleman conduisirent une étude sur les effets du projet de l'usine marémotrice de la Baie de Fundy à l'aide d'un modèle mathématique analytique simplifié, dans lequel les mouvements de marée étaient simulés en rapport avec les observations. Une approche généralisée utilisée dans le développement de ce modèle amena Meador en 1960 à rechercher s'il pouvait l'appliquer pour simuler les mouvements de marée dans l'estuaire du Delaware. Il en conclut que le modèle n'était adéquat que pour prédire les conditions moyennes et ne pouvait pas être utilisé pour prédire les variations de vitesses locales. Cependant, il est à noter que ce modèle a été développé pour simuler les mouvements de marée dans un bassin rectangulaire, alors que l'estuaire du Delaware a une forme d'entonnoir. Par la suite une modification a été apportée par Harleman (Ippen, 1966) aux équations de base afin que le modèle puisse être appliqué directement à un estuaire ayant une forme d'entonnoir.

En 1965, Vincent a révisé le précédent modèle dans le but de l'appliquer à la simulation des mouvements de marée dans l'estuaire du Saint-Laurent, qui est caractérisé par beaucoup d'irrégularités. Ce modèle était basé sur les mesures de temps et d'amplitude, le long de l'estuaire, dispo-

nibles dans les tables de marée du service hydrographique du Canada. En utilisant la méthode harmonique, il a obtenu des résultats intéressants, notamment le débit maximal de marée. Bien que le modèle se soit révélé un outil économique d'investigation pour les problèmes de marée, il ne permettait pas d'intégrer toutes les irrégularités de l'estuaire.

En 1967, Partensky et Louchard ont entrepris l'étude de la concentration saline dans l'estuaire du Saint-Laurent, basée dans sa partie théorique sur une approximation mathématique linéarisée. A l'aide du modèle mathématique choisi, une prédiction des marées moyennes et des vitesses maximales entre Québec et l'entrée de l'estuaire a été possible avec une bonne précision. Une série de mesures effectuées dans le fleuve a servi de base expérimentale pour déterminer la concentration de sel dans les différentes sections en fonction de la profondeur et de l'état de la marée. La comparaison avec les résultats théoriques des valeurs moyennes de salinité a permis d'établir une relation empirique simple décrivant la variation périodique de la teneur en sel dans le Saint-Laurent:

$$S = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} - \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \cos \frac{2\pi}{T} t$$

où T est la période de la marée et S la salinité moyenne. Les auteurs ont déduit que les variations de salinité et de vitesses sont en phase.

En 1968, Kamphuis a étudié la propagation de la marée sur modèle mathématique du Saint-Laurent s'étendant de Montréal jusqu'au golfe. Il a considéré le problème comme uni-dimensionnel dans son ensemble et a utilisé les méthodes aux différences finies. Le fleuve est ainsi divisé en un certain nombre de sections ayant chacune ses propres caractéristiques telles que la largeur, la longueur, la section transversale, la rugosité de fond, etc. Ensuite, les équations sont appliquées à chaque section en transformant les différentielles en différences finies. Ainsi trois types de modèle aux différences finies ont été envisagés: un schéma explicite et deux schémas implicites dont l'un ne tenait pas compte de l'île d'Orléans. Le schéma explicite est plus simple à programmer surtout pour des géométries compliquées. Il a néanmoins une tendance vers l'instabilité, alors que le schéma implicite paraît avoir une stabilité inconditionnelle. Les temps de calcul sur IBM 360/50 varient de 7 minutes pour le schéma explicite à 12 minutes pour les schémas implicites.

En 1970, Partensky et Warmoes ont amélioré le modèle harmonique présenté par Vincent (1965), en l'étendant au lac Saint-Pierre où une réflexion négative totale fut considérée. Les résultats obtenus se vérifient bien avec l'étude faite par Kamphuis (1968), à l'exception de la région amont qui donne des valeurs légèrement différentes. C'est pourquoi dans une étude ultérieure, Partensky et Marche

(1974) ont étudié la déformation subie par l'onde de marée en faible profondeur.

En 1970, Prandle a étudié la propagation de marée dans le Saint-Laurent, de Montréal à Pointe-au-Pic, en utilisant des modèles mathématiques uni et bi-dimensionnels combinés, avec la méthode explicite aux différences finies. Le modèle uni-dimensionnel a reproduit convenablement les hauteurs d'eau observées tout le long du fleuve. Une étude détaillée d'une petite section (région de l'île d'Orléans) a été établie en associant un modèle bi-dimensionnel avec un modèle uni-dimensionnel.

Plus récemment Prandle et Crookshank (1972, 1974) ont élaboré un modèle bi-dimensionnel portant sur la portion d'estuaire du Saint-Laurent comprise entre l'île d'Orléans et Pointe-au-Pic, complété par des portions uni-dimensionnelles, en amont jusqu'à Montréal, et tout le Saguenay. Le développement théorique de la technique numérique est identique à celui élaboré dans la référence précédente. Le modèle permet d'obtenir une image plus détaillée des vitesses en intensité et direction, ainsi que les amplitudes locales. De plus cette méthode possède l'avantage, sur les modèles physiques, de pouvoir examiner l'influence d'une force particulière sur le système entier.

Ouellet et Cheylus (1971) ont appliqué le modèle ma-

thématique élaboré avec schéma explicite par Kamphuis (1968) à une région de l'estuaire où les caractéristiques géométriques ont été fournies avec précision. Le modèle est limité à l'amont par la sortie du lac Saint-Pierre et à l'aval par Grosse-Ile. Il a été possible de déterminer la répartition des débits dans chaque branche du Saint-Laurent dans la région de l'île d'Orléans, les moments d'inversion du débit et l'influence de la fermeture de la branche nord de l'île d'Orléans sur les débits et les hauteurs d'eau dans la branche sud.

Par la suite, Ouellet et Cerceau (1974, 1975) ont proposé un modèle mathématique bi-dimensionnel de la variation cyclique de la salinité, afin d'améliorer les connaissances de la distribution de la salinité dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent. En fait le modèle est composé de deux modèles complémentaires, le premier, hydrodynamique, qui calcule les paramètres hauteur et vitesses nécessaires au fonctionnement du second modèle de salinité ou modèle de transport. Nous allons dans ce qui suit résumer les principales caractéristiques de ces modèles et donner les conclusions intéressantes obtenues de leur opération.

IV. MODÈLES MATHÉMATIQUES

4.1 Modèle hydrodynamique

Les mesures de salinité (Centre Canadien des Données

Océanographiques et Ministère des Transports, 1971) montrent que la région de l'estuaire à étudier en ce qui concerne la variation cyclique de la salinité est comprise essentiellement entre l'île d'Orléans et l'embouchure du Saguenay (figure 4.1). En effet, il ressort des mesures effectuées, que l'eau salée ne remonte que très rarement en amont de Saint-François de l'île d'Orléans, et qu'au-delà de l'embouchure du Saguenay, la salinité atteint 95% de ce qu'elle est dans l'Océan Atlantique Nord.

Cette région du Saint-Laurent à l'aval de l'île d'Orléans est le siège d'une variation cyclique de la salinité en fonction de la marée, ainsi que d'une répartition très irrégulière, dans le temps et dans l'espace, de la zone de mélange. En raison de l'importance de la forte turbulence dans cette région, l'estuaire est considéré comme bien mélangé. Cette hypothèse est d'ailleurs pleinement confirmée par les mesures in situ faites jusqu'à ce jour. Le gradient de densité verticale est donc plutôt faible. Par ailleurs, nous pouvons accepter une homogénéité verticale des vitesses comme tendent à la montrer, les mesures in situ. Par contre, comme nous l'avons déjà noté, le mélange devient de moins en moins homogène au fur et à mesure que l'on descend dans l'estuaire.

L'écoulement dans l'estuaire est tri-dimensionnel et non permanent. Toutefois, on admet que les pressions sont

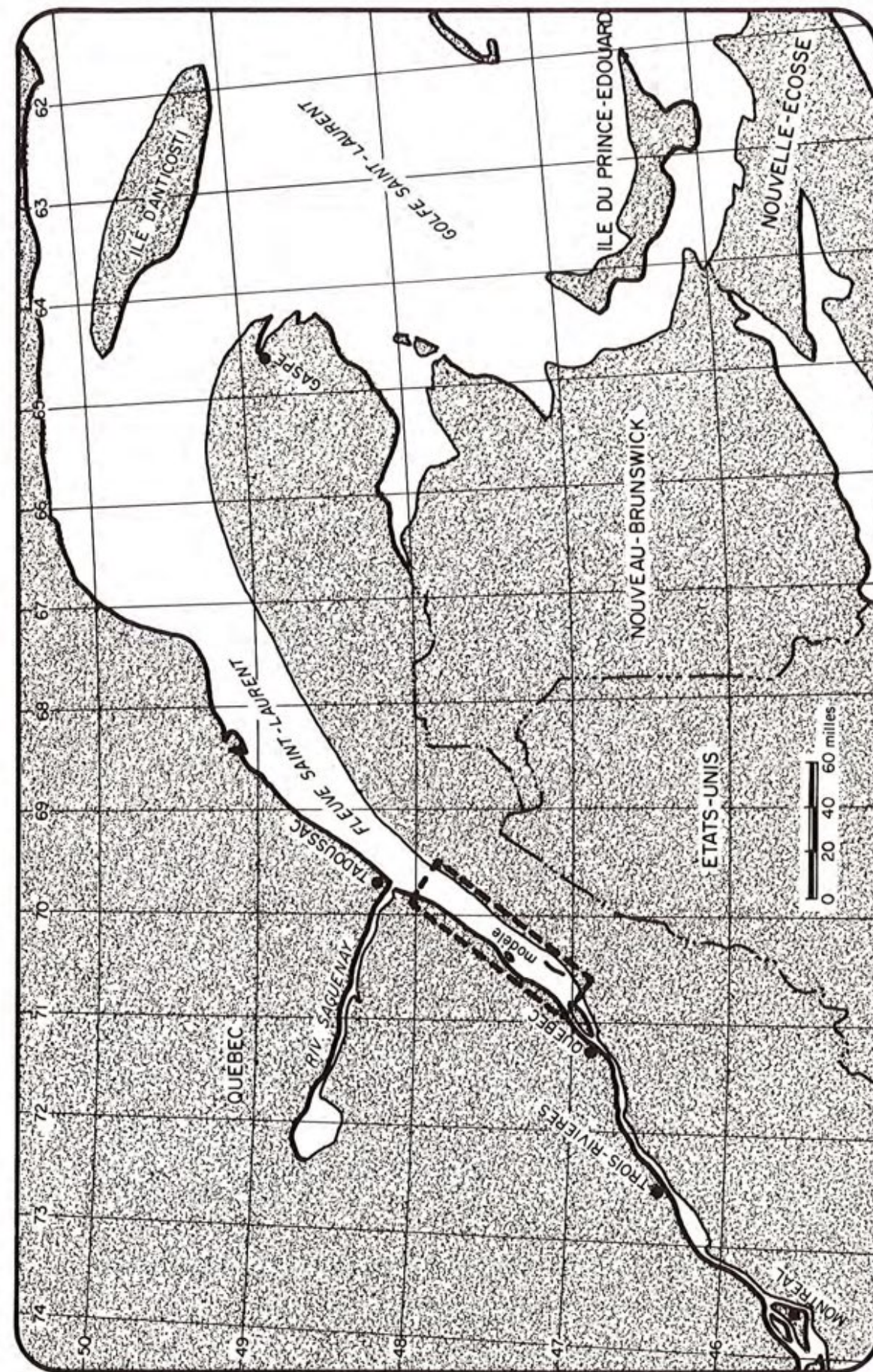


Fig. 4.1 — LOCALISATION DE L'ESTUAIRE MOYEN.

hydrostatiques, et que seules les composantes horizontales et les contraintes sur le fond et en surface sont importantes. Les fluctuations verticales de vitesses ne sont pas prises en compte, mais considérées comme incluses dans le terme de frottement. Compte tenu de ces simplifications, le modèle hydrodynamique est basé sur les équations de mouvement et de continuité intégrées sur la verticale, ce qui s'écrit pour un fluide incompressible en coordonnées d'Euler (Leendertse, 1967).

Équations du mouvement:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{U\sqrt{U^2+V^2}}{C^2(h+\eta)} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + g \frac{V\sqrt{U^2+V^2}}{C^2(h+\eta)} = 0$$

Équation de continuité:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\eta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\eta)V]}{\partial y} = 0$$

dans lesquelles h représente la profondeur d'eau par rapport à une référence fixée (par ex. le I.G.L.D. "International Great Lake Datum"), η la distance entre cette référence et la surface de l'eau, U et V les vitesses moyennes horizontales respectivement dans les directions x et y , f le paramètre de Coriolis ($f = 2 \omega \sin \phi$, $\omega =$ vitesse

de rotation de la terre et ϕ la latitude en degrés), C le coefficient de Chézy ($C = \frac{1.49}{n} (h+\eta)^{1/6}$, n étant le coefficient de Manning).

Pour schématiser la région étudiée, nous avons utilisé une grille formée d'éléments prismatiques de section carrée (voir figure 4.2)*, à chacun desquels le système précédent d'équations a été appliqué. La ligne côtière est alors représentée par une ligne brisée rectangulaire qui permet d'introduire sous une forme simple les conditions aux frontières. Ces frontières sont représentées par des parois solides à travers lesquelles il n'y a pas d'écoulement. Cette schématisation est particulièrement bien adaptée pour la résolution par la méthode des différences finies. Le schéma numérique adopté est un schéma explicite avec des différences centrales (Reid et Bodine, 1968), où les vitesses U et V sont calculées aux niveaux de temps impairs et l'élévation de la surface aux niveaux de temps pairs.

Conditions aux limites

Aux limites du modèle, la formulation mathématique donnée par le système d'équations doit être complétée pour décrire correctement l'interaction des frontières naturelles ou artificielles et de la masse liquide. Il y a les limites naturelles qui apparaissent à l'interaction entre le fleuve et les côtes ainsi qu'autour des îles. En ces

* Les figures 4.2, 4.7a, 4.7b, 4.7c et 4.8 sont en annexe.

endroits l'écoulement normal et le flux correctif doivent être nuls, et l'élévation de l'eau doit être toujours inférieure au niveau de la côte schématisée. D'autre part il y a les limites artificielles qui sont à la limite amont, fixée à Saint-François de l'île d'Orléans, le débit entrant ou sortant du modèle et à la limite aval, fixée à Gros Ca-couna, l'action de la marée provenant du golfe.

Conditions initiales

Au départ les conditions initiales sont prises comme si toute la masse d'eau était inerte, c'est-à-dire les vitesses moyennes horizontales U et V nulles partout. Après peu de temps, soit environ deux cycles de marées, le modèle atteint son régime, ce qui montre que le système soumis à des ondes forcées est peu sensible aux conditions initiales. Cependant pour les essais suivants, on démarre avec les résultats précédents, ce qui accélère la convergence.

Conditions de stabilité

Dans un schéma explicite, le pas de la grille et l'intervalle de temps découlent de considérations mathématiques se rapportant à la stabilité et à la convergence du modèle. Cependant l'analyse de la stabilité des équations complètes n'est pratiquement pas réalisable, et la condition simplifiée bien connue de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) est la

plus utilisée pour ce genre d'étude. Elle s'écrit:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2g H_{\max}}}$$

dans laquelle $\Delta s = \Delta x = \Delta y$ est le pas de la grille et H_{\max} la profondeur d'eau maximale rencontrée (120 m). Compte tenu de ces considérations, du coût de calcul sur ordinateur et de la précision désirée, on a adopté un pas de grille de 1 mille (1,6 km) et un intervalle de temps de 30 s. Pour ces mêmes raisons on omet généralement les termes non-linéaires convectifs qui ont une influence relativement faible sur les résultats (Mash et Shankar, 1969). Sinon il faut apporter des termes correctifs pour accroître la stabilité de la solution.

Résultats et leur interprétation

La première étape de l'opération d'un modèle mathématique, tout comme pour les modèles physiques, consiste à opérer le modèle de façon à obtenir des résultats qui coïncident avec des valeurs mesurées. C'est la vérification du modèle, qui consiste plus précisément à trouver les coefficients de frottement qui permettent d'obtenir une bonne représentation des conditions simulées. Pour le cas étudié il est apparu qu'un choix du coefficient de Manning de 0.023 pour la partie aval et de 0.025 pour la partie amont, ayant une topographie plus irrégulière, donnait une bonne repré-

sentation de localisation et de la phase de la marée (voir figure 4.3). La vérification de la validité du modèle a pu être confirmée par une comparaison entre les caractéristiques calculées et mesurées pour quelques stations sur un cycle de marée (voir figure 4.4).

On peut alors calculer les paramètres hydrodynamiques pour différentes conditions d'opérations correspondant aux cas qui ont le plus d'intérêt pour une étude donnée. On peut aussi déterminer facilement l'influence de la force de Coriolis en faisant exécuter le programme avec ou sans ce paramètre. Les résultats obtenus ont pu démontrer que ce paramètre avait une influence relativement faible sur le régime hydrodynamique de cette portion, entraînant une variation transversale du niveau d'eau d'au plus de 0.1 m (0.3 pi). On pourra visualiser ces phénomènes dans les résultats obtenus du modèle de transport, pour lequel le modèle hydrodynamique sert de base pour représenter les conditions hydrodynamiques.

4.2 Modèle de transport

La distribution de la salinité dans un estuaire dépend essentiellement de deux processus, à savoir la convection et la diffusion, qui résultent de l'influence de la marée, des conditions hydrologiques, de la circulation et des ouvrages de contrôle. Le transport de substances conservatives peut être décrit en terme de convection nette, de dif-

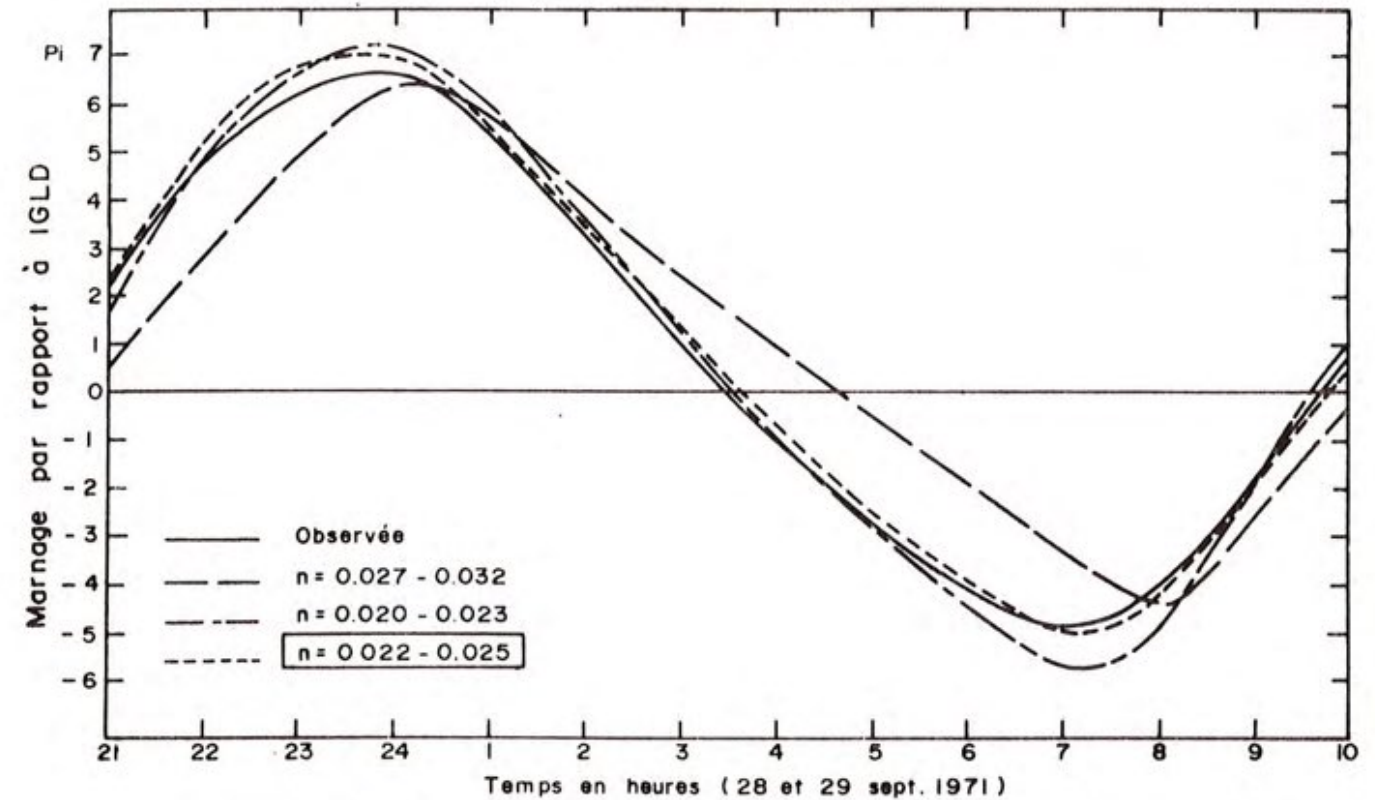


Fig. 4.3a) INFLUENCE DU COEFFICIENT DE RUGOSITÉ SUR LA MARÉE À BERTHIER.

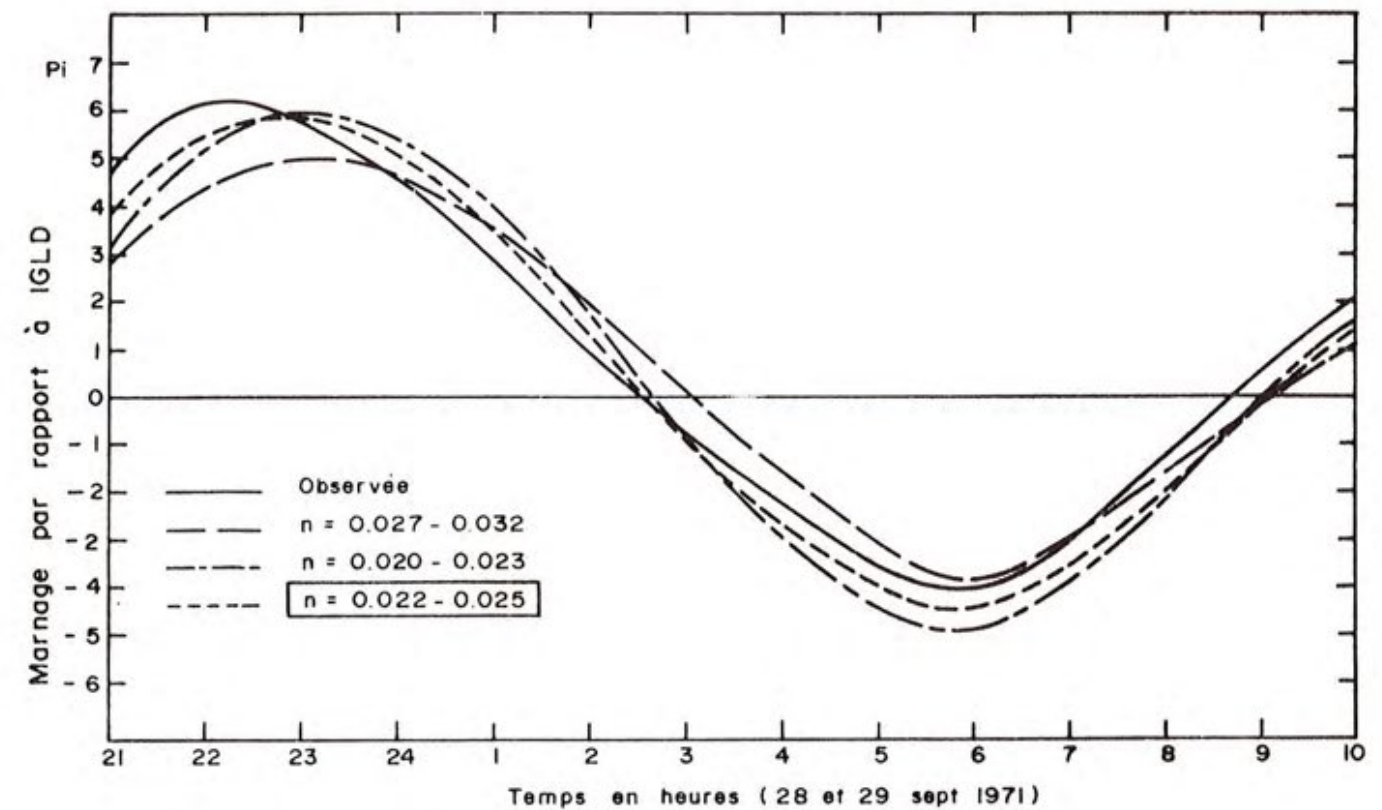


Fig. 4.3b) INFLUENCE DU COEFFICIENT DE RUGOSITÉ SUR LA MARÉE À SAINT-JEAN PORT-JOLI.

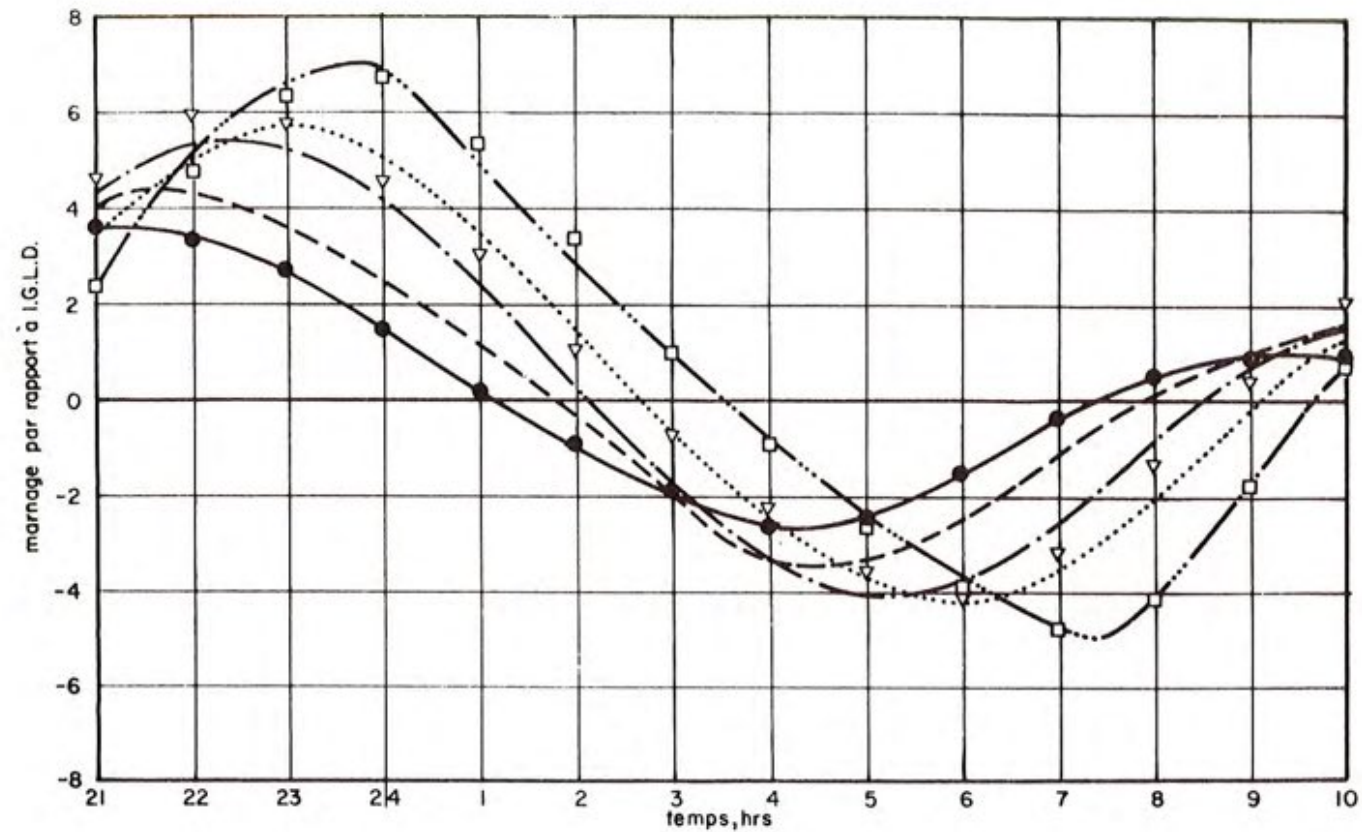
fusion et de dispersion.

L'équation de diffusion - convection pour un écoulement turbulent peut être décrit à partir de l'analogie entre la diffusion moléculaire et la diffusion turbulente (Holley, 1969). Toutefois dans les estuaires réels, la diffusion moléculaire est négligeable devant la diffusion turbulente. De plus les phénomènes de convection sont reconnus comme les mécanismes contribuant le plus à la dispersion des substances dans un estuaire (Harleman, Lee et Hall, 1968). Celle-ci résulte des fluctuations spatiales de la vitesse, tandis que la diffusion provient des fluctuations temporelles de la vitesse.

La simulation du processus de la salinité dans l'estuaire du Saint-Laurent est établie à partir de l'équation de dispersion - convection intégrée sur la verticale, ce qui donne:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y})$$

dans laquelle C représente la concentration moyenne sur la colonne d'eau, U et V sont les vitesses moyennes horizontales respectivement dans les directions x et y , et E_x , E_y les coefficients correspondants de dispersion, qui tiennent compte aussi de la diffusion turbulente. Ces équations bi-dimensionnelles présupposent donc que la composante



station	calculé	observé
Cacouna	—	●
Cap à l'aigle	- - -	●
St-Joseph de la Rive	- · - · -	●
St-Jean-Port-Joli	·····	▽
St-François	- - - - -	□

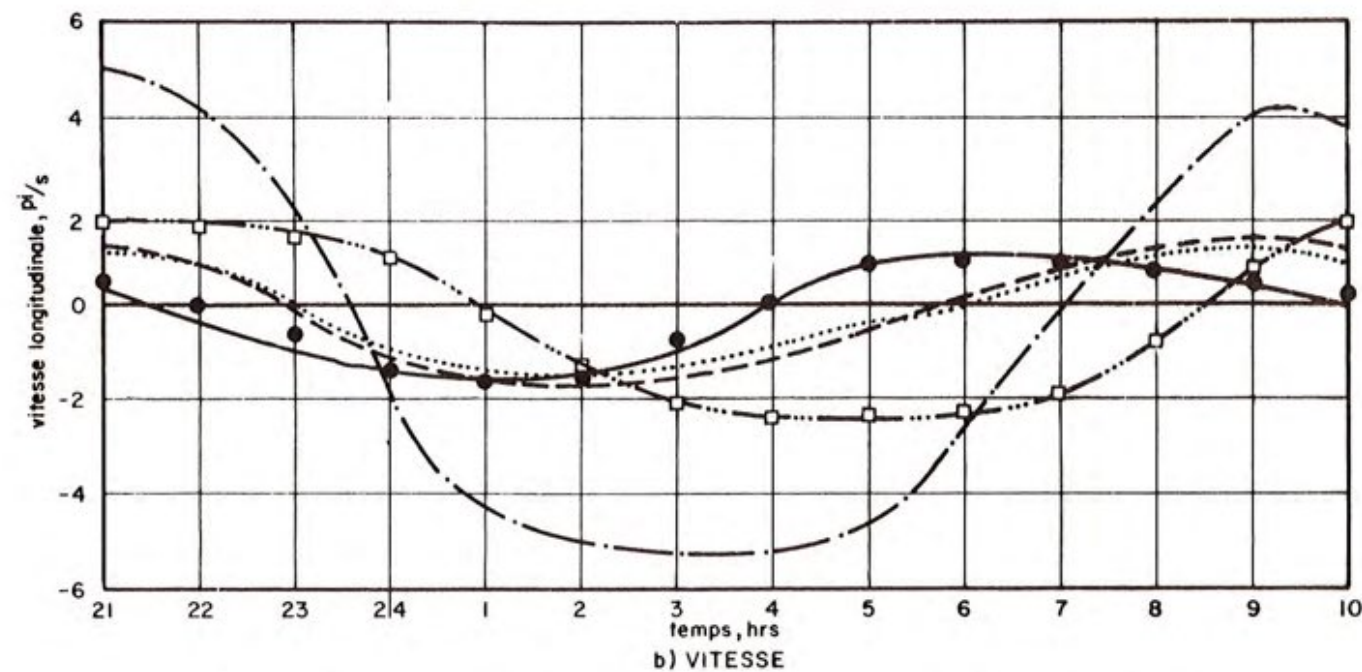


Fig.4.4 — COMPARAISON ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES CALCULÉES ET MESURÉES.

verticale de la vitesse est nulle et que l'estuaire est bien mélangé.

Le fait de négliger les variations de la densité dues à la salinité dans les équations du mouvement permet de résoudre les équations hydrodynamiques et l'équation de dispersion - convection séparément. Cette approximation est très avantageuse en ce sens que les équations hydrodynamiques convergent après très peu de cycles de marées tandis qu'il faut un beaucoup plus grand nombre de cycles de marée pour atteindre la convergence de l'équation de dispersion - convection. De plus la résolution des équations hydrodynamiques requiert un intervalle de temps beaucoup plus petit que celui requis pour l'équation de transport.

Il existe plusieurs expressions pour la valeur du coefficient de dispersion, mais nous avons retenu pour la description du processus de la salinité l'équation modifiée de Taylor, soit:

$$E_x = K_x n |U| R_H^{5/6}$$

$$E_y = K_y n |V| R_H^{5/6}$$

où n est le coefficient de Manning, U et V les vitesses moyennes horizontales, R_H le rayon hydraulique égal à la profondeur d'eau, et K_x et K_y des coefficients qui

sont ajustés de façon à ce que le modèle réponde à des conditions imposées. De plus il a été démontré que le coefficient de dispersion est plus grand en nature (Holley, Harleman et Fisher, 1970) qu'en laboratoire (Elder, 1959) à cause du gradient latéral de vitesse et qu'il croît avec une augmentation de la salinité (Ippen et Harleman, 1961 et Bellessort et Migniot, 1972).

Modèle numérique

Le modèle de salinité doit satisfaire plusieurs exigences et en particulier être compatible avec le modèle hydrodynamique établi au préalable. On doit ainsi utiliser la même grille puisque les caractéristiques hydrodynamiques telles que les vitesses et hauteurs d'eau servent d'entrée au modèle de salinité.

Pour la résolution numérique, on peut comme précédemment utiliser soit un schéma implicite soit un schéma explicite. Les schémas explicites, qui sont les plus simples à programmer, ont par contre des contraintes de stabilité du calcul qui sont de plus en plus sévères lorsque la valeur du coefficient de dispersion est petite. Dans ces cas, il faut alors avoir recours à des schémas implicites qui sont beaucoup plus stables. Toutefois dans les estuaires, comme celui du Saint-Laurent, les variations transversales de la vitesse entraînent une augmentation considérable du coefficient de dispersion et le choix d'une méthode explicite

n'est restrictif que pour l'intervalle de temps, généralement approximé par l'expression suivante:

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{2[E_x \Delta x^2 + E_y \Delta y^2]}$$

Par conséquent, on est conduit à utiliser les mêmes types d'opérateur de différence que précédemment pour le modèle hydrodynamique. Pour les calculs nous avons adopté comme intervalle de temps $\Delta t = 360$ s, ce qui établit, pour le pas de grille déjà considéré, une valeur limite supérieure pour $E_x + E_y = 3\,500 \text{ m}^2/\text{s}$ ($38\,000 \text{ pi}^2/\text{s}$).

Conditions aux limites

Les principaux types de conditions aux limites requis pour décrire l'interaction des frontières avec les substances contenues dans la masse liquide sont les suivantes:

- la convection à travers les limites naturelles doit être nulle, c'est-à-dire $U \frac{\partial C}{\partial x} = V \frac{\partial C}{\partial y} = 0$ suivant l'orientation de la normale à la limite;
- la dispersion à travers ces mêmes limites doit aussi être nulle, c'est-à-dire $\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial y} = 0$;
- les concentrations aux extrémités du modèle doivent être connues. A l'aval les valeurs sont déduites à partir d'enregistrements de la variation de la salinité en fonction du temps, tandis qu'à l'amont ces valeurs sont régies par l'existence de l'eau douce.

Conditions initiales

Comme l'indique la figure 4.5, le nombre de cycles de marée requis est considérable si on part avec des valeurs nulles partout. C'est pourquoi il est préférable de débiter les calculs avec une distribution approximative de la salinité le long de l'estuaire.

Résultats et leur interprétation

La mise au point du modèle consiste à ajuster les coefficients E_x et E_y de telle sorte que la distribution de la salinité soit vérifiée pour une série de mesures faites en nature. On a pu constater que, pour obtenir des résultats intéressants, la variation du coefficient de dispersion augmentait avec la salinité suivant la relation (Ippen et Harleman, 1961):

$$E_x = \frac{E_o B}{x+B}$$

où E_o est la salinité à l'embouchure, E_x la salinité à une distance x de l'embouchure et B la distance hors de l'embouchure pour laquelle la salinité devient égale à celle de l'océan. Dans la solution finale le coefficient longitudinal adopté varie de $150|U|h^{5/6}$ à l'aval, à $10|U|h^{5/6}$ à l'amont.

Dans une première série d'essais on a cherché à éva-

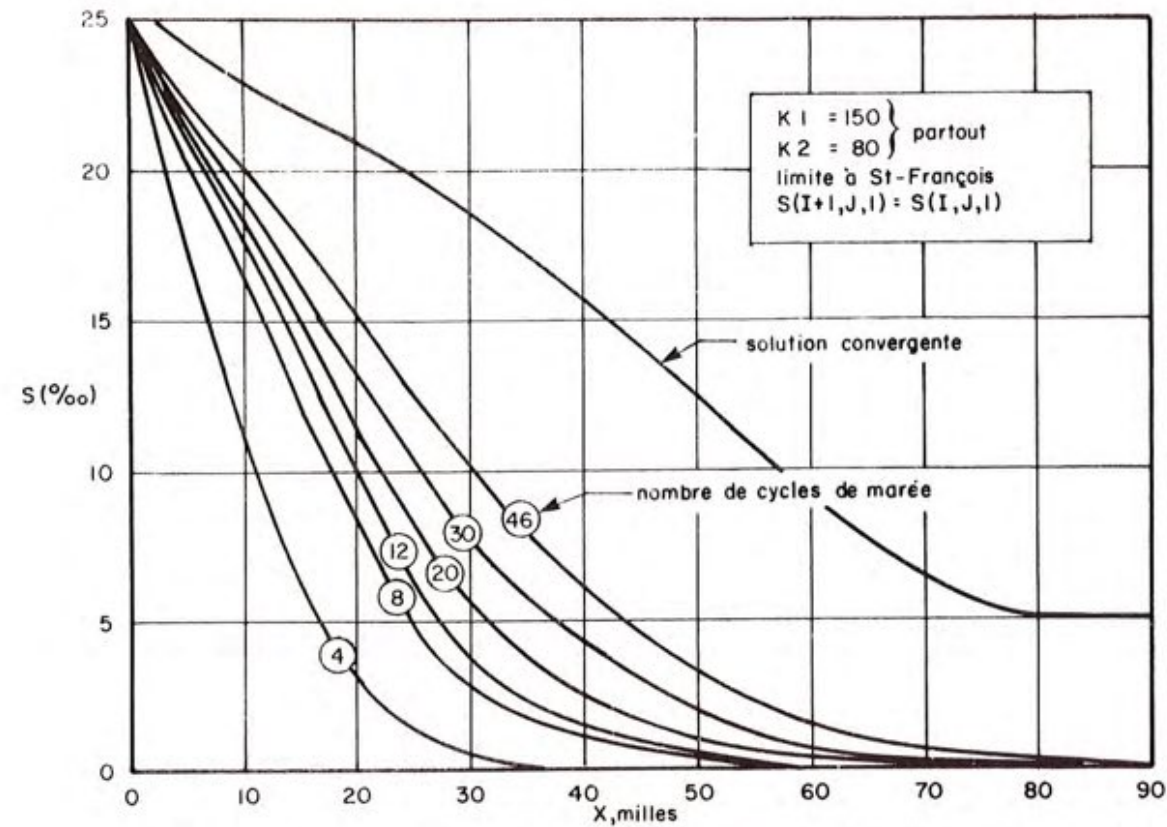


Fig.4.5 — PROPAGATION DE LA SALINITÉ DANS L'EAU DOUCE SUIVANT UN PROFIL LONGITUDINAL.

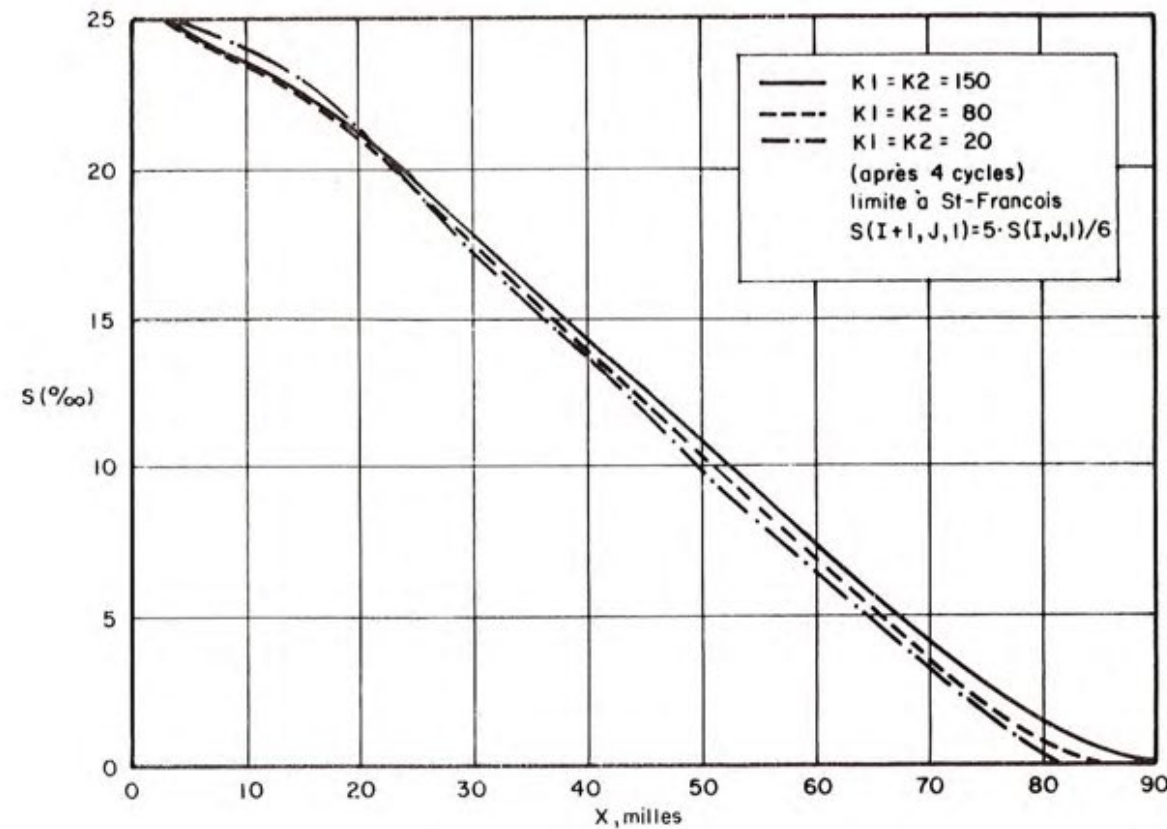
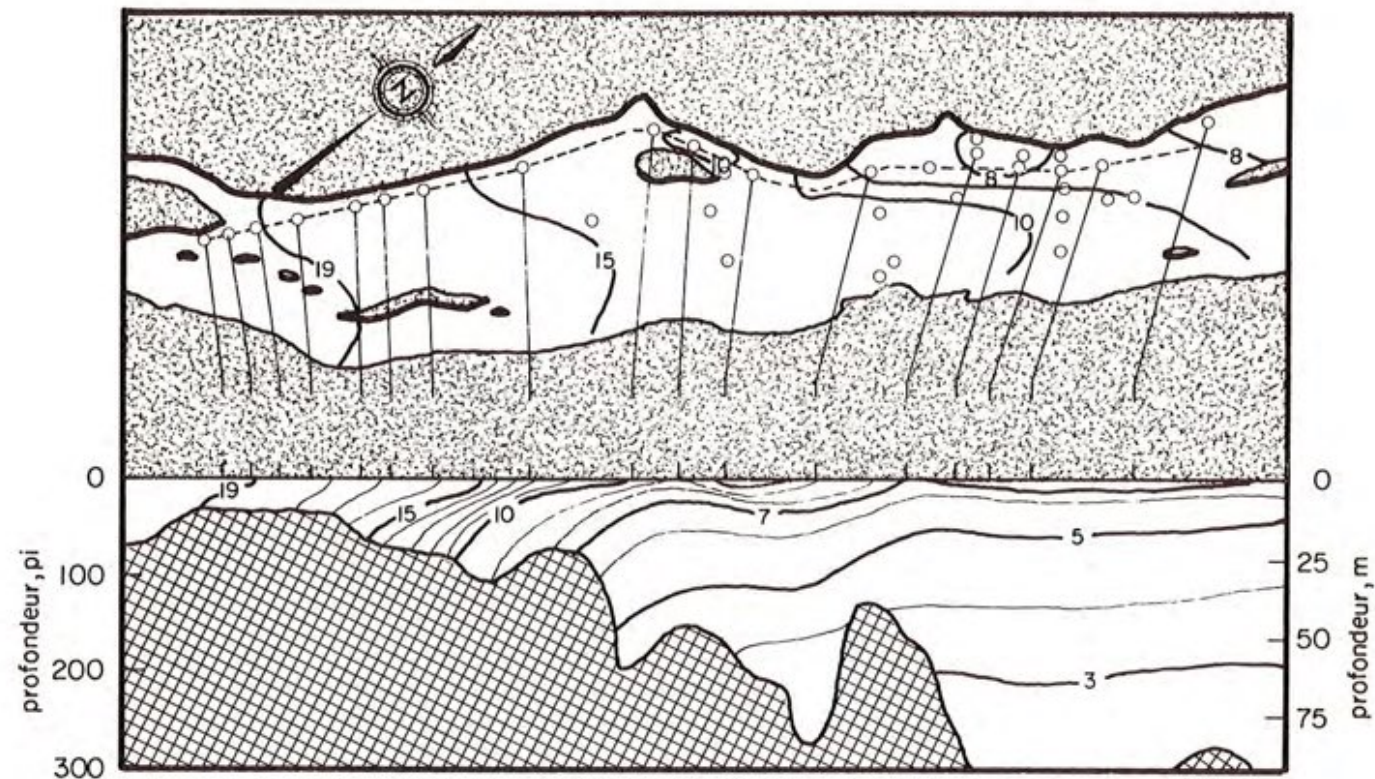


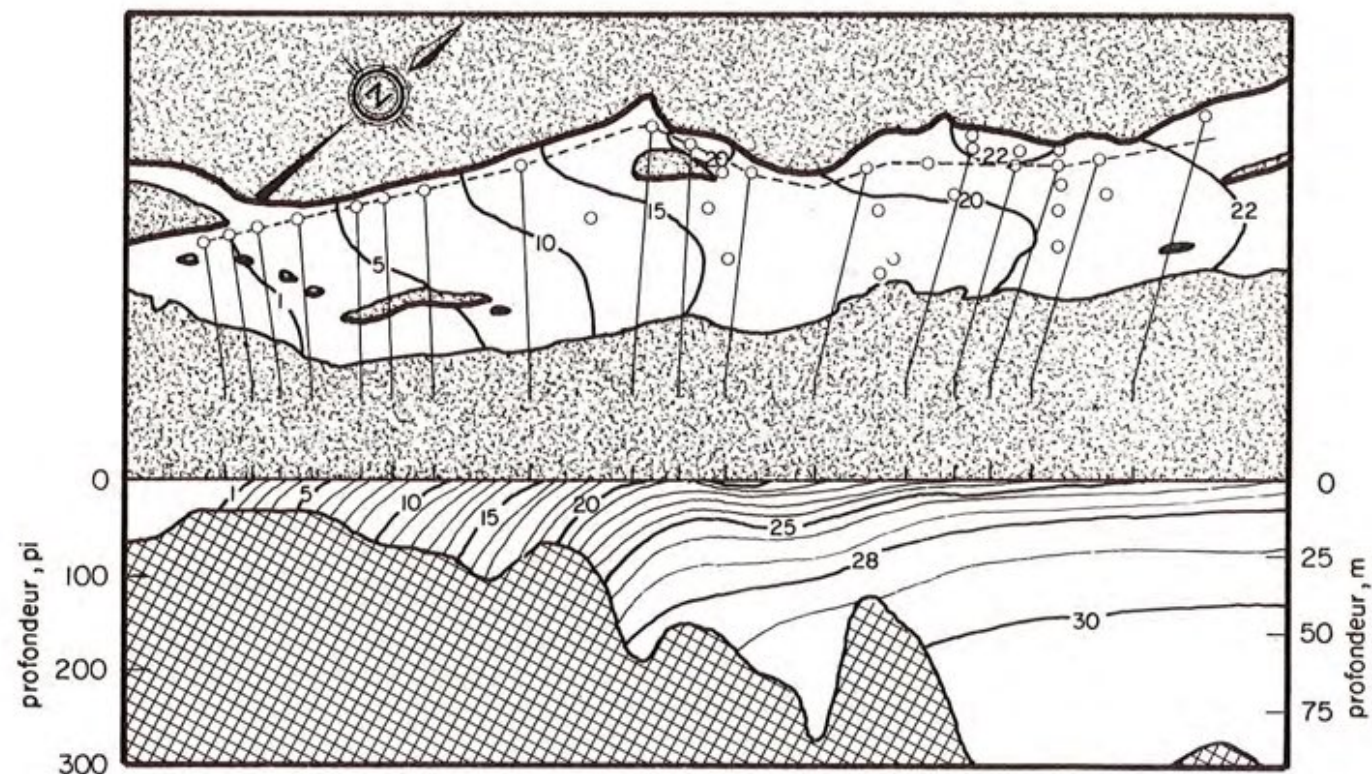
Fig.4.6 — INFLUENCE DES COEFFICIENTS DE DISPERSION SUR LA DISTRIBUTION DE LA SALINITÉ.

luer l'influence d'une variation du coefficient de dispersion sur la distribution de la salinité. Les résultats obtenus, montrés à la figure 4.6, font voir qu'une variation du coefficient de dispersion de $E_x = 20|U|h^{5/6}$ à $E_x = 150|U|h^{5/6}$ entraîne une faible variation de la distribution de la salinité.

Les figures 4.7 donnent une représentation des résultats obtenus à partir du modèle numérique pour trois périodes consécutives sur un cycle de marée, à savoir à 1 h, 3 h et 5 h le 29 septembre 1971, période pour laquelle des données étaient disponibles. Afin de permettre une certaine comparaison, on a tracé sur la figure 4.8 les isohalines moyennes à marée haute et à marée basse obtenues à partir d'un grand nombre de données de salinité compilées depuis 1939. En général on peut tirer que les salinités calculées correspondent mieux aux valeurs mesurées à l'amont de la zone de mélange des eaux douces et salées qu'à l'aval de l'estuaire. Ces résultats s'expliquent par le fait que l'estuaire n'est pas bien mélangé sur toute sa longueur, tel que montré à la figure 4.9, obtenus à partir d'une série de mesures de la salinité le long de l'estuaire (Bousfield et Filteau, 1973). Le gradient vertical de salinité devient de plus en plus important dans la partie aval de l'estuaire, où l'hypothèse de l'homogénéité verticale n'est plus valable. Des remarques similaires ont été précédemment notés par Prandle et Crookshank (1974) lorsqu'ils ont comparé les vi-



a) DISTRIBUTION MOYENNE DE LA TEMPÉRATURE, (°C)



b) DISTRIBUTION MOYENNE DE LA SALINITÉ, (‰)

Fig. 4.9 — DISTRIBUTION MOYENNE DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA SALINITÉ EN ÉTÉ LE LONG DE L'ESTUAIRE MOYEN.

tesses calculées à l'aide du modèle avec celles mesurées en nature (Ministère des Mines et Ressources, 1939). La dimension verticale doit alors être prise en considération et le recours à un modèle tridimensionnel est présentement au stade d'étude (Leendertse, Liu, Alexander, Nelson, 1973, 1975). L'élaboration de ce type de modèle est très complexe et le coût d'exploitation sur ordinateur est très dispendieux en plus de nécessiter l'utilisation d'ordinateurs très puissants.

La forme résultante des isohalines s'explique bien en tenant compte de la force de Coriolis et de la différence de densité en l'eau douce et l'eau salée. La force de Coriolis, qui résulte de la rotation de la terre, tend à dévier toute particule en mouvement vers la droite dans l'hémisphère nord. Ainsi les eaux douces moins denses en surface, dont le mouvement net est vers l'aval, sont déviées vers la rive sud, tandis que les eaux salées plus denses au fond, dont le mouvement net est vers l'amont, sont déviées vers la rive nord. Comme l'état de mélange varie le long de l'estuaire, cet effet est aussi variable suivant cette dimension.

CONCLUSIONS

Après avoir présenté des généralités sur les estuaires et donné une description physique de l'estuaire du Saint-Laurent, en nous concentrant plus principalement sur la zone

de mélange des eaux douces et des eaux salées, nous avons révisé les principales études qui se sont orientées à décrire ce milieu complexe. Les modèles mathématiques se sont avérés jusqu'à présent comme les plus versatiles pour présenter une image globale de la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques sous l'influence de diverses conditions hydrodynamiques.

Une étude sur modèle mathématique s'avère très utile pour évaluer l'influence d'un paramètre en particulier comme ce fut le cas pour la force de Coriolis. On aurait pu tout aussi bien tenir compte de l'effet du vent sur la surface de l'eau, paramètre qui peut avoir une influence à court terme sur la distribution de la salinité dû à la modification des courants qu'il entraîne. Les différentes conditions de marée et de débit d'eau douce qui peuvent se produire dans l'estuaire peuvent être aussi l'objet d'une étude sur modèle mathématique.

Toutefois la principale utilité de ces résultats réside dans le fait qu'ils servent de base à l'étude d'autres processus physiques chimiques et biologiques. C'est le cas en particulier de l'étude des processus sédimentaires dont les mécanismes sont régis par la connaissance des conditions hydrodynamiques et de la distribution de la salinité et de la température. Il faudra alors envisager le développement de modèles qui feront intervenir une interaction possible

entre les diverses substances contenues dans le milieu. Ces différentes étapes sont nécessaires en vue d'obtenir une meilleure connaissance de la qualité du milieu et d'un éventuel contrôle de son état.

RÉFÉRENCES

- BELLESSERT, B. et C. MIGNIOT, 1972. *Étude comparative des mouvements sédimentaires dans quelques estuaires*. La Houille Blanche, No 8, pp. 695-702.
- BOUSFIELD, E.L. et G. FILTEAU, 1973. *Recent Studies on the Hydrobiology of the Middle St. Lawrence Estuary*. Proc. 2nd Intern. Estuarine Conference, Myrtle Beach, South Carolina, U.S.A.
- BROCHU, M., 1961. *Déplacements de blocs par la glace le long du Saint-Laurent*. Étude Géographique No 30. Direction de la Géographie, Ministère des Mines et des relevés techniques. Ottawa.
- DEPARTMENT OF MINES AND RESOURCES, 1939. *Tidal Current Charts, St. Lawrence River Estuary, Orleans Island to Father Point*. Hydrographic and Map Service, Surveys and Engineering Branch, Ottawa, Tidal Publication No 21.
- DEPARTMENT OF TRANSPORTS, 1971. *Salinity Survey: Ile d'Orléans to Ile Gros Cacouna*.
- ELDER, J.W., 1959. *The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow*. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 5, No 4, pp. 544-560.
- EMERY, K.O. and R.E. STEVENSON, 1957. *Estuaries and Lagoons. I. Physical and Chemical Characteristics*. In Treatise on Marine Ecology and Paleoecology I., edited by J.W. Hedgpeth. Geol. Soc. Am., Mem. 67, pp. 673-693.
- FUNKE, E.R., 1972. *Computer Control and Data Acquisition of a Tidal Model*. MH-110, Hydraulics Laboratory, National Research Council of Canada, Ottawa, 86 p.
- HARLEMAN, D.R.F., 1966. *Tidal Dynamics in Real Estuaries*. Chapter 10, from Estuary and Coastline Hydrodynamics, edited by A.T. Ippen, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass., pp. 493-545.
- HARLEMAN, D.R.F. and A.T. IPPEN, 1967. *Two-Dimensional Aspects of Salinity Intrusion in Estuaries: Analysis of Salinity and Velocity Distributions*. U.S. Army Corps of Engineers, Committee on Tidal Hydraulics, Technical Bulletin No 13.
- HARLEMAN, D.R.F., C.H. LEE and L.C. HALL, 1968. *Numerical Studies of Unsteady Dispersion in Estuaries*. Journal of the Sanitary Engineering Division, A.S.C.E., No SA5, Proc. Paper 6160, pp. 897-911.
- HOLLEY, E.R., 1969. *Unified View of Diffusion and Dispersion*. Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., Vol. 95, No HY2, Proc. Paper 6462, pp. 621-631.
- HOLLEY, E.R., D.R.F. HARLEMAN and H.B. FISCHER, 1970. *Dispersion in Homogeneous Estuary Flow*. Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., Vol. 96, No HY8, Proc. Paper 7488, pp. 1691-1709.
- IPPEN, A.T. and D.R.F. HARLEMAN, 1958. *Investigation of Influence of Proposed International Passamaquoddy Tidal Power Project on Tides in the Bay of Fundy*. Report to U.S. Army Engineer Division, New England Corps of Engineers, Boston, Mass.
- IPPEN, A.T. and D.R.F. HARLEMAN, 1961. *One Dimensional Analysis of Salinity Intrusions in Estuaries*. Corps of Engineers, U.S. Army Technical Bulletin, No 5.
- IPPEN, A.T., 1966. *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. McGraw-Hill Book Company, Toronto, 744 p.
- KAMPHUIS, J.W., 1968. *Mathematical Model Study of the Propagation of Tides in the St. Lawrence River and Estuary*. MH-105, Hydraulics Laboratory, National Research Council of Canada, Ottawa, 62 p.
- LEENDERTSE, J.J., 1967. *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water Wave Propagation*. The Rand Corporation R-M-5294-PR., 165 p.
- LEENDERTSE, J.J., S.K. LIU and R.C. ALEXANDER, 1973. *A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas. Volume I, Principles of Computation*. Rand Corporation, R-1417-OWRT, 57 p.
- LEENDERTSE, J.J. and S.K. LIU, 1975. *A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas. Volume II, Aspects of Computation*. Rand Corporation, R-1764-OWRT, 123 p.
- LEENDERTSE, J.J., S.K. LIU and A.B. NELSON, 1975. *A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas. Volume III, The Interim Program*. Rand Corporation, R-1884-OWRT, 23 p.
- MASH, F.D. and N.J. SHANKAR, 1969. *Mathematical Simulation of Two-Dimensional Horizontal Convective-Dispersion in Well-Mixed Estuaries*. Congrès AIRH, pp. C32-1, C32-9.

- MEADOR, M.F., 1960. *Determination of the Tidal Characteristics in the Delaware Estuary by a Mathematical Model*. Master of Science Thesis, M.I.T., Cambridge, Mass.
- NEU, H.J.A., 1970. *A Study on Mixing and Circulation in the St. Lawrence Estuary up to 1964*. Atlantic Oceanogr. Lab. Rep. 1970-9, Bedford Inst. Oceanogr., Dartmouth, N.S., Canada, 31 p.
- QUELLET, Y. et J.F. CHEYLUS, 1971. *Étude du modèle mathématique de la propagation des marées dans le fleuve Saint-Laurent*. Application du modèle mathématique et étude de la région de l'île d'Orléans, Université Laval, 37 p.
- QUELLET, Y. et J. CERCEAU, 1974. *Modèle mathématique pour l'étude de la variation cyclique de la salinité dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent*. Centre de Recherches sur l'Eau, Rapport No CRE-74107, 112 p.
- QUELLET, Y. and J. CERCEAU, 1975. *Simulation of the Salinity Distribution in the St. Lawrence Estuary by a Two-Dimensional Mathematical Model*. Symposium on Modelling Techniques, San Francisco, pp. 1249-1269.
- PARTENSKY, H.W. et L. LOUCHARD, 1967. *Étude sur la variation cyclique de la salinité moyenne dans l'estuaire du Saint-Laurent*. École Polytechnique de Montréal, 147 p.
- PARTENSKY, H.W. et J.C. WARMOES, 1970. *Études des marées dans l'estuaire du Saint-Laurent à l'aide d'un modèle mathématique linéarisé*. École Polytechnique de Montréal, 88 p.
- PARTENSKY, H.W. et C. MARCHE, 1974. *Étude de la déformation progressive de l'onde de marée dans l'estuaire du Saint-Laurent*. Rapport de la section hydraulique, École Polytechnique, Université de Montréal, 70 p.
- PRANDLE, D., 1970. *Combined One and Two-Dimensional Mathematical Model of the St. Lawrence River*. LTR-HY-13, Hydraulics Laboratory, National Research Council of Canada, Ottawa, 33 p.
- PRANDLE, D. and N.L. CROOKSHANK, 1972. *Numerical Model Studies of the St. Lawrence River*. MH-109, Hydraulics Laboratory, National Research Council of Canada, Ottawa, 104 p.
- PRANDLE, D. and N.L. CROOKSHANK, 1974. *Numerical Model of the St. Lawrence River Estuary*. Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., No HY4, Proc. Paper 10472, pp. 517-529.

- REID, R.O. and B.R. BODINE, 1968. *Numerical Model for Storm in Galveston Bay*. Journal of the Waterways and Harbors Division, A.S.C.E., No WW1, Proc. Paper 5805, pp. 33-57.
- SIMMONS, H.B., 1954. *Some Effects of Upland Discharge on Estuarine Hydraulics*. Proc. A.S.C.E., Hydraulics Division. Vol. 81, Separate No 792.
- VINCENT, R., 1965. *An Investigation to the Tidal Characteristics of the St. Lawrence Estuary by a Mathematical Model*. 113 p.