

Sciences
TD
380
A1
C132
1,5

TD
380
A1
C132

les cahiers de centreau



CENTREAU
Centre de recherches sur l'eau

JS

ÉVOLUTION DES SUSPENSIONS ET SÉDIMENTS DANS L'ESTUAIRE MOYEN DU SAINT-LAURENT

Alain SOUCY
Yves BÉRUBÉ
Jean-Pierre TROUDE
Philippe MÉRIC



UNIVERSITÉ LAVAL
Québec, Canada

Vol. I, No 5, septembre 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.

**ÉVOLUTION DES
SUSPENSIONS ET SÉDIMENTS
DANS L'ESTUAIRE MOYEN
DU SAINT-LAURENT**

Alain SOUCY
Yves BÉRUBÉ
Jean-Pierre TROUDE
Philippe MÉRIC

Cette étude est la synthèse de plusieurs travaux effectués en 1974 et 1975 dans l'estuaire moyen du fleuve Saint-Laurent et subventionnés par le Conseil National de Recherches du Canada, le ministère Environnement Canada et le Groupe de Travail sur le Saint-Laurent. Les travaux ont pu être réalisés grâce également au ministère des Transports du Canada dont les données ont été gracieusement mises à la disposition des auteurs.

SOUCY, Alain: Professeur titulaire à la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Alain Soucy est chargé des cours d'hydraulique des conduites et d'hydraulique urbaine au Département de Génie Civil. Gradué de cette même université en 1961 où il obtient un baccalauréat en Sciences Appliquées (Génie Civil), il reçoit une bourse de l'ASTEF, puis du ministère des Richesses naturelles pour poursuivre des études en hydraulique à l'Université de Grenoble où il obtient en 1963 un diplôme d'ingénieur-docteur.

En 1968, Alain Soucy participe très étroitement à la fondation de CENTREAU et devient en juillet 1969 le premier directeur du Centre qu'il dirige jusqu'en 1975 alors qu'il accepte la direction du Service Environnement de la Société d'Énergie de la Baie James.

BÉRUBÉ, Yves: Diplômé en génie du Massachusetts Institute of Technology dont il détient un doctorat, Yves Bérubé est professeur agrégé à la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval depuis 1967 où il enseigne la valorisation des minerais. A ce titre, il a fondé le Groupe de recherche en automatisation appliquée à l'industrie minière et a participé à la fondation de CENTREAU où il a coordonné plusieurs travaux de recherche sur la pollution de l'eau par l'industrie minière.

TROUDE, Jean-Pierre: Maître es Sciences en physique de l'Université d'Amiens (France) en 1971, il est venu à l'Université Laval dans le cadre des échanges France-Québec pour satisfaire aux exigences d'une maîtrise sur la stabilité des suspensions colloïdales (1973-75). Il est actuellement assistant de recherches à Centreau où il poursuit ses études.

MÉRIC, Philippe: Ingénieur en hydraulique de l'ENSEEIH de Toulouse (France), Philippe Méric a fait en 1975 un stage au Centre de Recherches sur l'Eau de l'Université Laval où il a participé à l'étude du régime hydrodynamique du fleuve Saint-Laurent et à celle de sa sédimentation.

RÉSUMÉ

La connaissance des processus sédimentaires dans les estuaires est encore à ses débuts, même si de nombreux travaux de recherche sont en cours dans plusieurs estuaires du monde. La complexité des phénomènes non permanents de ces zones de mélange et les réactions physico-chimiques dues à l'augmentation de la salinité, expliquent la difficulté des chercheurs à comprendre ces processus.

Les présents travaux, effectués dans l'estuaire du fleuve Saint-Laurent depuis l'Île d'Orléans jusqu'à l'Île aux Coudres, constituent un premier jalon pour tenter de décrire la zone de forte turbidité qui évolue au gré des débits et marées dans cette région. Ils s'ajoutent aux études de Ouellet et Cerceau (1976) présentées dans le numéro précédent des CAHIERS DE CENTREAU, mais ils se rapportent plus directement aux processus sédimentaires et en particulier à la circulation résiduelle et à la stabilité colloïdale des particules en suspension.

Les résultats de ces dernières études permettent d'expliquer globalement les mécanismes qui contrôlent cette zone de turbidité sans toutefois atteindre une quantification pour toutes les conditions de marées ou de saisons. Certains des résultats ainsi obtenus sont à comparer aux observations déduites des données traitées du satellite ERTS.

Beaucoup d'autres travaux seront nécessaires avant qu'on puisse développer un modèle pour simuler toutes ces conditions et prédire le comportement des sédiments en vue de les contrôler ou de les aménager.

ABSTRACT

Knowledge on sedimentary processes in estuaries is still in the beginning, even if much research work is in progress in many estuaries of the world. Complexity of non-permanent phenomena in those mixing zones and physical chemical reactions due to increased salinity, explain researchers' difficulty to understand these processes.

Present studies, carried out in the St. Lawrence Estuary, from the Île d'Orléans to the Île aux Coudres, constitute a first try to describe the high turbidity zone which goes back and forth with flows and tides in that zone. They are additions to Ouellet and

Cerceau studies published (1976) in the preceding issue of LES CAHIERS DE CENTREAU, but they are more directly related to sedimentary processes and, in particular, to residual circulation and colloidal stability of suspended particles.

The output of these latter studies allows for a global explanation of the controlling mechanism in that turbidity zone without reaching however quantitative evaluation for all tidal or seasonal conditions. Some results such as those obtained, should be compared to data deducted from ERTS satellite.

Many further studies will be necessary before a model can be developed to generate all these conditions and forecast the sediments behavior in view of their control and disposal.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
I. <u>LA CIRCULATION RÉSIDUELLE DANS LA ZONE DE MÉLANGE ESTUARIENNE DU SAINT-LAURENT</u>	3
A) MÉTHODE D'ANALYSE	3
B) DONNÉES SUR LES COURANTS	6
C) VALIDITÉ DES RÉSULTATS	9
D) CARACTÉRISTIQUES DE LA CIRCULATION RÉSIDUELLE	10
1. <u>Caractéristiques générales</u>	10
2. <u>Évolution longitudinale</u>	12
3. <u>Évolution transversale</u>	18
E) CONCLUSION	22
II. <u>LA STABILITÉ DES SUSPENSIONS DANS LES ESTUAIRES</u>	23
A) BUT DE L'ÉTUDE	23
B) LA STABILITÉ COLLOÏDALE	23
C) ÉCHANTILLONNAGE DES SUSPENSIONS	26
D) TECHNIQUES DE MESURE UTILISÉES	27
1. <u>Le microscope électronique</u>	28
2. <u>Le compteur Coulter</u>	28
3. <u>L'ultramicroscope</u>	29
E) COMPORTEMENT DES SUSPENSIONS	30
1. <u>Campagne de mesure de l'été 1974</u>	32
2. <u>Échantillonnage effectué en juillet 1975</u>	36
3. <u>Études en laboratoire</u>	40
F) CONCLUSION	46
III. <u>LES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DANS LA ZONE DE MÉLANGE ESTUARIENNE</u>	49
A) DISTRIBUTION DES MATIÈRES EN SUSPENSION	49
1. <u>La floculation</u>	49
2. <u>La succession de déposition et de remise en suspension avec le renversement de courant</u>	49
3. <u>Le "bouchon de turbidité"</u>	49

B) LOCALISATION DES ZONES DE DÉPÔT	55
1. Le chenal nord	55
2. Le chenal Beaujeu	55
3. Les battures de la rive sud entre Montmagny et Rivière-Ouelle	56
4. Les hauts fonds et les bancs découverts	56
C) NATURE ET QUALITÉ DES SÉDIMENTS DE FOND	56
1. Extrémité aval du bras nord de l'Île d'Orléans	57
2. Le chenal Beaujeu entre l'Île aux Oies et la rive sud	58
3. La baie de Sainte-Anne-de-la-Pocatière	60
IV. <u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	62
<u>RÉFÉRENCES</u>	67

ÉVOLUTION DES SUSPENSIONS ET SÉDIMENTS
DANS L'ESTUAIRE MOYEN DU SAINT-LAURENT

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les estuaires jouent un rôle de plus en plus important dans l'environnement et les activités de l'homme par le fait de plusieurs facteurs:

- leur utilisation comme voies navigables et la nécessité de l'entretien de chenaux permettant à des navires toujours plus importants de pénétrer au plus profond des pays;
- l'augmentation des activités tant industrielles que touristiques le long de leurs rives;
- le contrôle de la pollution et la préservation de l'écosystème estuarien.

Dans un tel milieu, la zone de mélange estuarienne, transition entre les eaux douces du fleuve et les eaux salées de la mer, est d'un grand intérêt, du fait de la multiplicité des processus physiques, chimiques et biologiques qui s'y développent. Parmi ceux-ci, les processus sédimentaires sont encore très mal connus, car ils dépendent de phénomènes non permanents et de la stabilité des suspensions.

Dans le cadre de la Mission Saint-Laurent du Centre de Recherches sur l'Eau de l'Université Laval qui porte sur "le rôle et l'importance des sédiments dans la qualité du fleuve", plusieurs travaux de recherche ont été effectués dans la zone de mélange estuarienne.

La formation de l'estuaire et les processus hydrodynamiques qui le régissent ont déjà été décrits par Ouellet et Cerceau (1976). Le présent travail complète les études précédentes sur l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Il porte sur l'évolution des suspensions dont le comportement est influencé par la circulation résiduelle et la coagulation des particules colloïdales. Globalement, le phénomène se traduit par l'apparition d'un "bouchon de turbidité" qui se développe entre l'Île d'Orléans et l'Île aux Coudres.

→ Dans cette région, située juste en aval de l'avancée maximale, les variations de salinité sont les plus importantes de l'estuaire. D'autre part, le débit du fleuve et les marées régissent la circulation qui conditionne le mélange des eaux douces aux eaux salées. Ces deux phénomènes, lorsqu'associés, permettent d'expliquer la formation du "bouchon de turbidité"; les variations de salinité influencent la stabilité des suspensions et les courants définissent leur possibilité de déplacement et de sédimentation.

I. LA CIRCULATION RÉSIDUELLE DANS LA ZONE DE MÉLANGE ESTUARIENNE DU SAINT-LAURENT

A) MÉTHODE D'ANALYSE

La non-permanence des écoulements dans les estuaires rend difficile l'étude de la sédimentation à partir de l'analyse directe des courants dont on observe par ailleurs de grandes variations en fonction de la profondeur.

Simmons (1966) a préconisé une méthode d'analyse de la circulation verticale en étudiant les variations de la vitesse sur un cycle complet de marée. Cette méthode consiste à porter, en fonction du temps, les vitesses en un point situé à une profondeur donnée (fig. 1). La superficie sous-tendue par les couches de jusant et de flot est représentative de l'écoulement dans cette direction.

On peut définir un écoulement résiduel $S_j - S_f$ et une vitesse résiduelle

$$V_R = \frac{S_j - S_f}{T}$$

en le divisant par la période du cycle de marée, soit environ 12 h. 25 min. pour le Saint-Laurent. La vitesse résiduelle est positive si l'écoulement est dirigé vers l'aval, négative s'il est dirigé vers l'amont.

En calculant les vitesses résiduelles pour plusieurs points d'une même verticale, il est possible de matérialiser le gradient de ces vitesses résiduelles.

La figure 2 montre une répartition schématique idéale des vitesses. On note un écoulement résiduel dirigé vers l'amont au fond et vers l'aval en surface dans toute l'étendue de l'intrusion saline. En amont du point nodal, l'écoulement est dirigé vers l'aval à toutes les profondeurs. On définit le point nodal, comme la limite amont des points à vitesse résiduelle négative. Ce point correspond à la limite de l'intrusion saline et est souvent le site d'une accumulation locale des sédiments. La position du point nodal peut évidemment varier en fonction de la marée et du débit fluvial.

Cependant, le courant résiduel ainsi mis en relief n'est pas un bloc en soi, mais le produit de plusieurs composantes (Bowden, 1967). Il est constitué de:

- Un courant de densité qui résulte des gradients de densité et qui se traduit par un courant vers l'aval près de la surface et vers l'amont près du fond;
- Un courant préférentiel de flot et de jusant lié à la morphologie de l'estuaire et à des phénomènes (comme la force de Coriolis) qui sont matérialisés par l'individualisation des chenaux de flot et de jusant.
- Un courant lié au débit fluvial qui donne lieu à une vitesse moyenne vers l'aval: $V_{f1} = Q_{f1}/A$

où V_{f1} est la vitesse moyenne en m/s, Q_{f1} le débit fluvial en m^3/s et A la section de l'estuaire en m^2 .

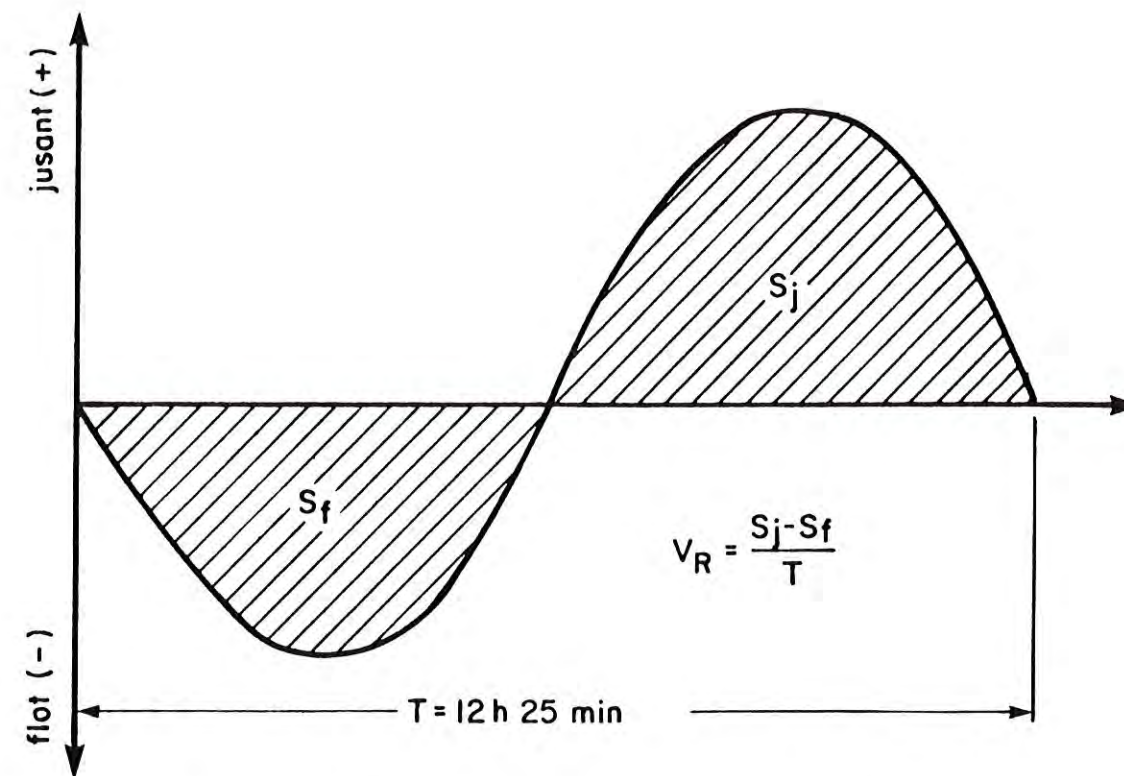


Fig. 1 - CALCUL DES VITESSES RÉSIDUELLES.

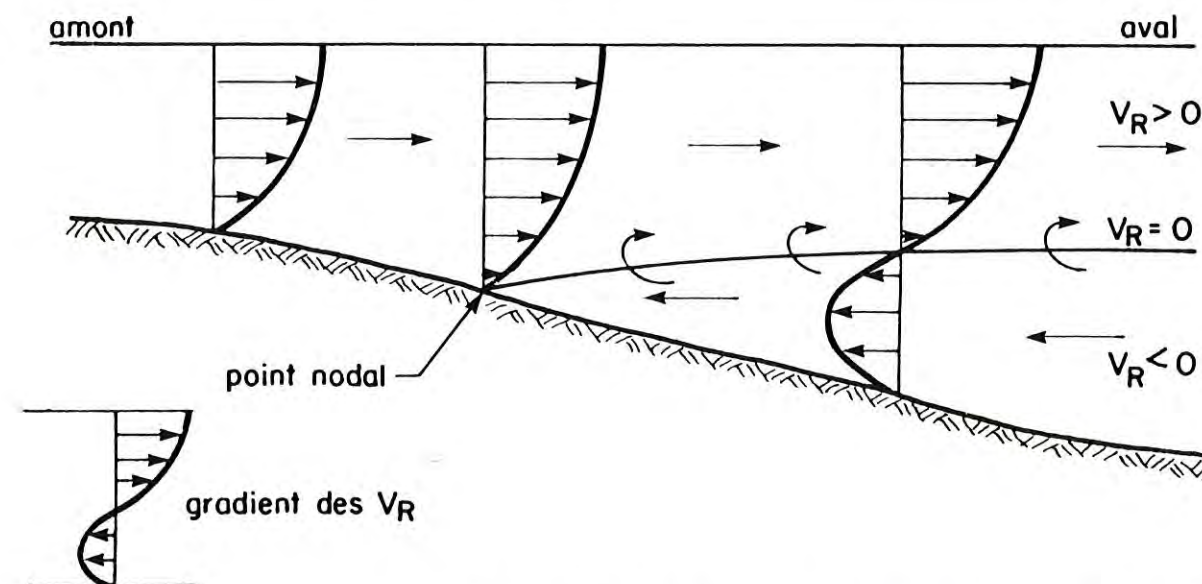


Fig. 2 - RÉPARTITION SCHÉMATIQUE DES V_R DANS UN ESTUAIRE IDÉAL.

d) Un courant dû aux effets des inégalités de niveau dans les marées diurnes.

Ces différentes composantes de la vitesse et notamment les deux premières, éloignent passablement l'écoulement résiduel réel d'un estuaire du schéma idéal. Ainsi, lors de l'étude de la circulation résiduelle dans la zone de mélange du Saint-Laurent, on doit garder à l'esprit l'existence de ces facteurs qui peuvent modifier l'évolution de l'ensemble de la circulation.

L'analyse des vitesses résiduelles présente l'avantage de pouvoir expliquer la circulation estuarienne en des termes désolidarisés de l'effet des marées. Dans le cas particulier du Saint-Laurent, nous verrons que les résultats peuvent apporter quelques éclaircissements sur les concentrations de solides en suspension ainsi que sur les processus sédimentaires.

B) DONNÉES SUR LES COURANTS

Les données qui ont été utilisées proviennent en grande partie d'un rapport du ministère des Transports du Canada, Division du Chenal maritime du Saint-Laurent, intitulé: "Salinity Survey, Île d'Orléans to Île du Gros Cacouna, 1971". Elles présentent l'avantage de couvrir de façon satisfaisante la partie amont de la zone de mélange estuarienne et de fournir simultanément les valeurs de la salinité et de la température à toutes les heures

et à différentes profondeurs. Elles offrent également la possibilité de pouvoir comparer les valeurs des vitesses résiduelles pour deux états différents de marée.

Cependant, ces données ne couvrent pas une variation de débit fluvial appréciable et ne s'étendent pas au-delà de la section transversale entre Saint-Roch-des-Aulnaies et l'Île aux Coudres. Aussi, afin de compléter les renseignements tirés de ce rapport et dans le but de mieux préciser l'évolution transversale des vitesses, nous avons utilisé les carnets de mesure de la campagne de 1966 du ministère des Transports ainsi que les carnets qui ont servi à la rédaction du rapport intitulé: "Hydraulic Survey - Île aux Coudres, 1968". La localisation des points de mesure traités est représentée en figure 3.

À partir de l'ensemble de ces données, nous avons tracé les courbes de vitesse après avoir mesuré par planimétrie les surfaces soutendues correspondant aux écoulements de flot et de jusant. La somme algébrique de ces surfaces divisée par la période du cycle de marée (12 h. 25 min.) donne la vitesse résiduelle au point de mesure. Puis, la vitesse résiduelle est calculée pour chaque point de mesure à 5, 20, 40, 60, 80 et 95 pour cent de la profondeur moyenne.

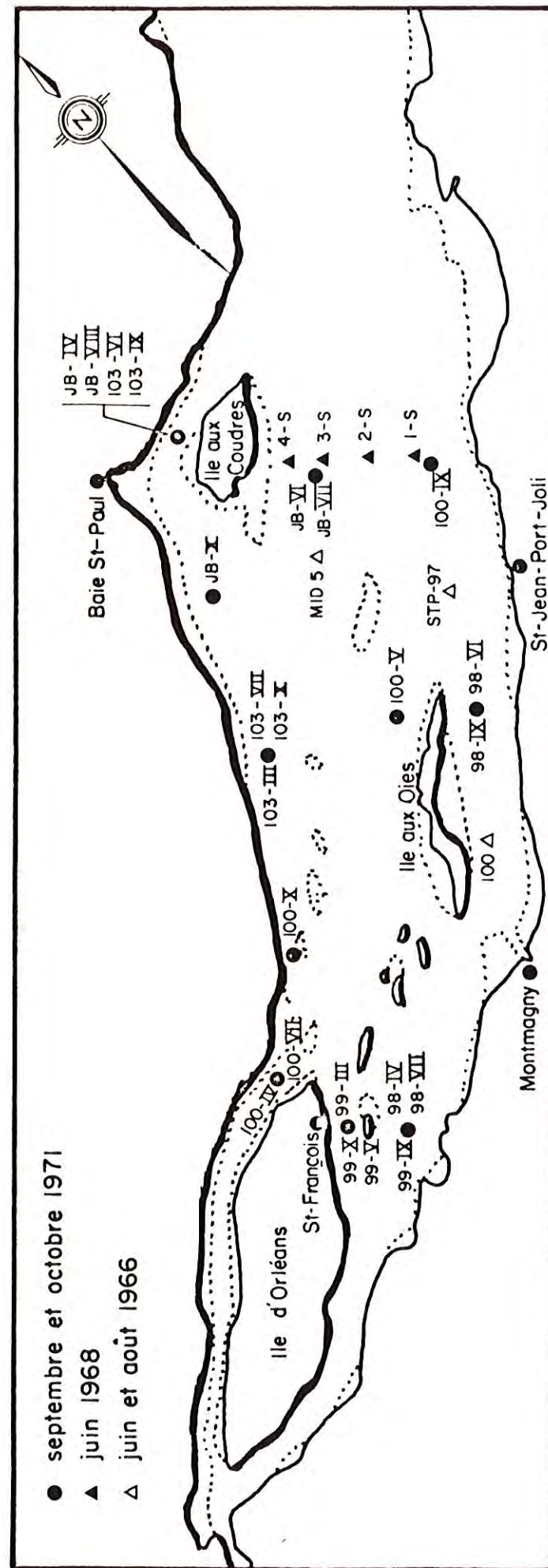


Fig. 3 - LOCALISATION DES POINTS DE MESURE.

C) VALIDITÉ DES RÉSULTATS

Avant d'interpréter les résultats obtenus, nous jugeons souhaitable de préciser la validité des vitesses résiduelles ainsi calculées. En effet, trois facteurs interviennent pouvant mettre en doute la valeur des résultats obtenus:

- a) Les vecteurs courants en un point de mesure ne demeurent pas parallèles à une direction fixe pendant un cycle de marée et ils peuvent suivre une figure elliptique dite "ellipse de courant". Dans le calcul de la vitesse résiduelle, on intègre sur un axe correspondant à l'écoulement majeur et l'on "masque" ainsi les vitesses transversales. Toutefois, ce facteur est atténué par le fait que la quasi totalité des points de mesure est située dans des chenaux où l'écoulement est mieux défini et où les ellipses de courant ont des formes plus aplaties.
- b) Dans l'estuaire du Saint-Laurent les marées présentent des inégalités journalières essentiellement sur les niveaux de haute mer. Ce facteur influe sur les courants de jusant et de flot, comme on peut le remarquer pour les points dont la période de mesure s'étend sur plus de 18 heures. La valeur de la vitesse résiduelle peut donc varier selon l'intervalle sur lequel le planimétrage est effectué. Chaque fois qu'il a été possible, le planimétrage a été répété pour différents intervalles et l'on peut constater des variations de l'ordre de

1.5×10^{-2} m/s à 2.4×10^{-2} m/s sur la vitesse résiduelle. Celles-ci seront d'autant plus sensibles que les vitesses résiduelles auront des valeurs proches de zéro.

- c) Le calcul de la vitesse résiduelle ne se fait pas à une distance définie du fond, mais à un pourcentage donné de la profondeur totale, donc à une profondeur variable au cours du cycle de marée.

Tous ces facteurs, auxquels on peut ajouter l'imprécision inhérente au planimétrage, conduisent à limiter l'utilisation des résultats. Aussi, lors d'une deuxième étape, la méthode devrait être améliorée, notamment dans le cas de futures campagnes de mesure où le calcul de l'écoulement résiduel serait pris en considération (mesure des composantes transversales et périodes plus étendues). Néanmoins, même s'ils ont une portée restreinte, les résultats obtenus peuvent permettre de définir de manière satisfaisante la circulation résiduelle dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent.

D) CARACTÉRISTIQUES DE LA CIRCULATION RÉSIDUELLE

1. Caractéristiques générales

Les différentes valeurs des vitesses résiduelles, tant au fond qu'en surface, ont été portées en figure 4 pour une marée

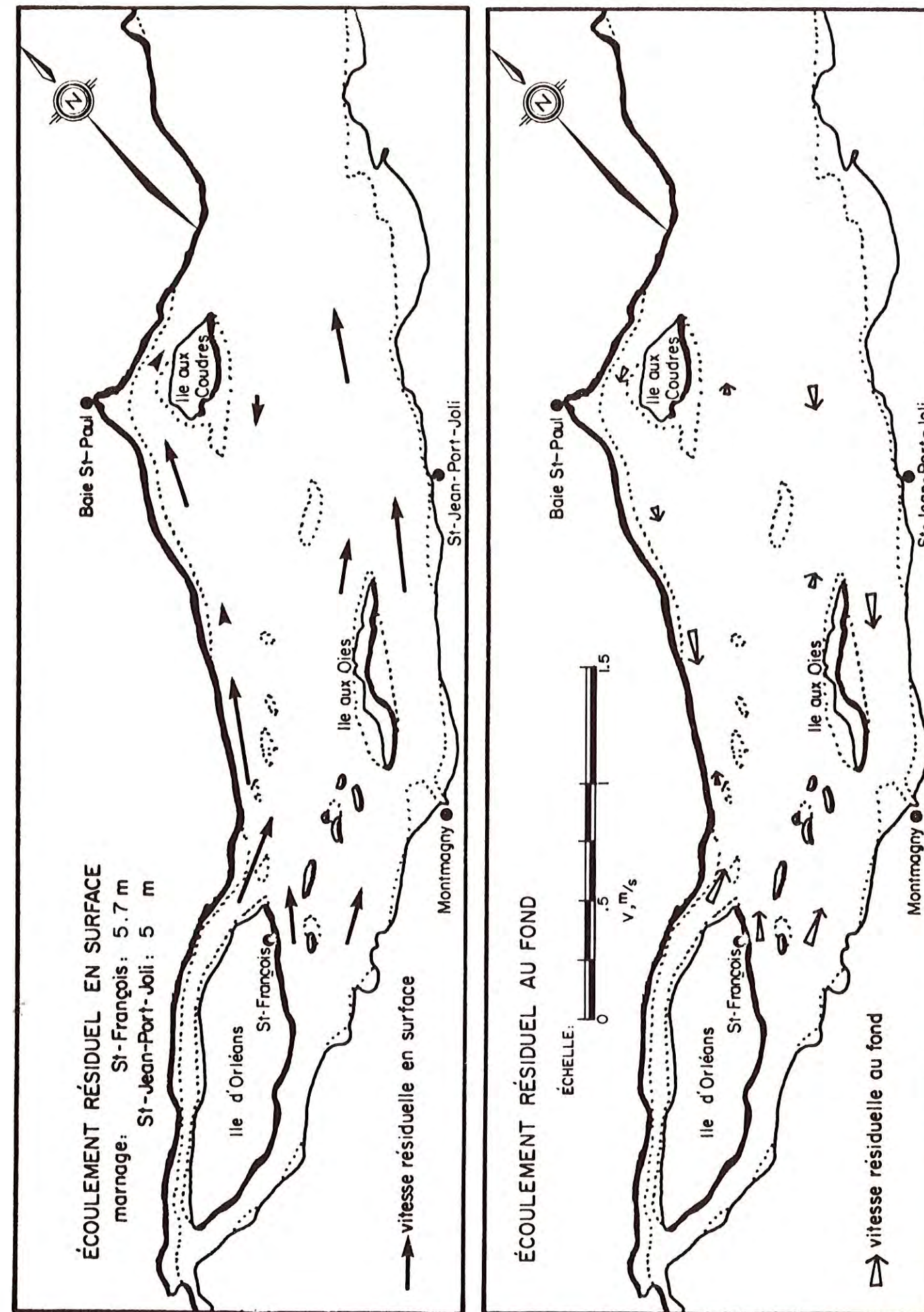


Fig. 4 - SCHEMA DE L'ÉCOULEMENT RÉSIDUEL LE 9 SEPTEMBRE 1971, MARÉE FORTE.

d'amplitude relativement forte (5.7 m à Saint-François) et en figure 5, pour une marée d'amplitude plus faible (4.5 m à Saint-François). Dans les deux cas, le débit fluvial à Québec est le même, soit de l'ordre de 10 000 m³/s.

On constate qu'immédiatement en aval de l'Île d'Orléans et aussi bien dans le bras nord que dans le bras sud, l'écoulement résiduel est dirigé vers l'aval à toutes les profondeurs et dans les deux cas de marée considérés.

Un peu plus bas cependant, deux chenaux se distinguent par une avancée préférentielle de la sous-couche à vitesse résiduelle amont; ce sont:

- le chenal nord, depuis Cap Gribane jusqu'à l'Île aux Coudres;
- le chenal Beaujeu entre l'Île-aux-Oies et la rive sud.

Au niveau de l'Île aux Coudres, l'écoulement résiduel au fond est dirigé vers l'amont dans toutes les zones à l'exception des hauts fonds, mais on note une anomalie dans les gradients de vitesse résiduelle au sud de l'Île aux Coudres.

2. Évolution longitudinale

a) Chenal nord

Les figures 6 pour une forte marée et 7 pour une faible marée, montrent les variations de vitesse résiduelle dans

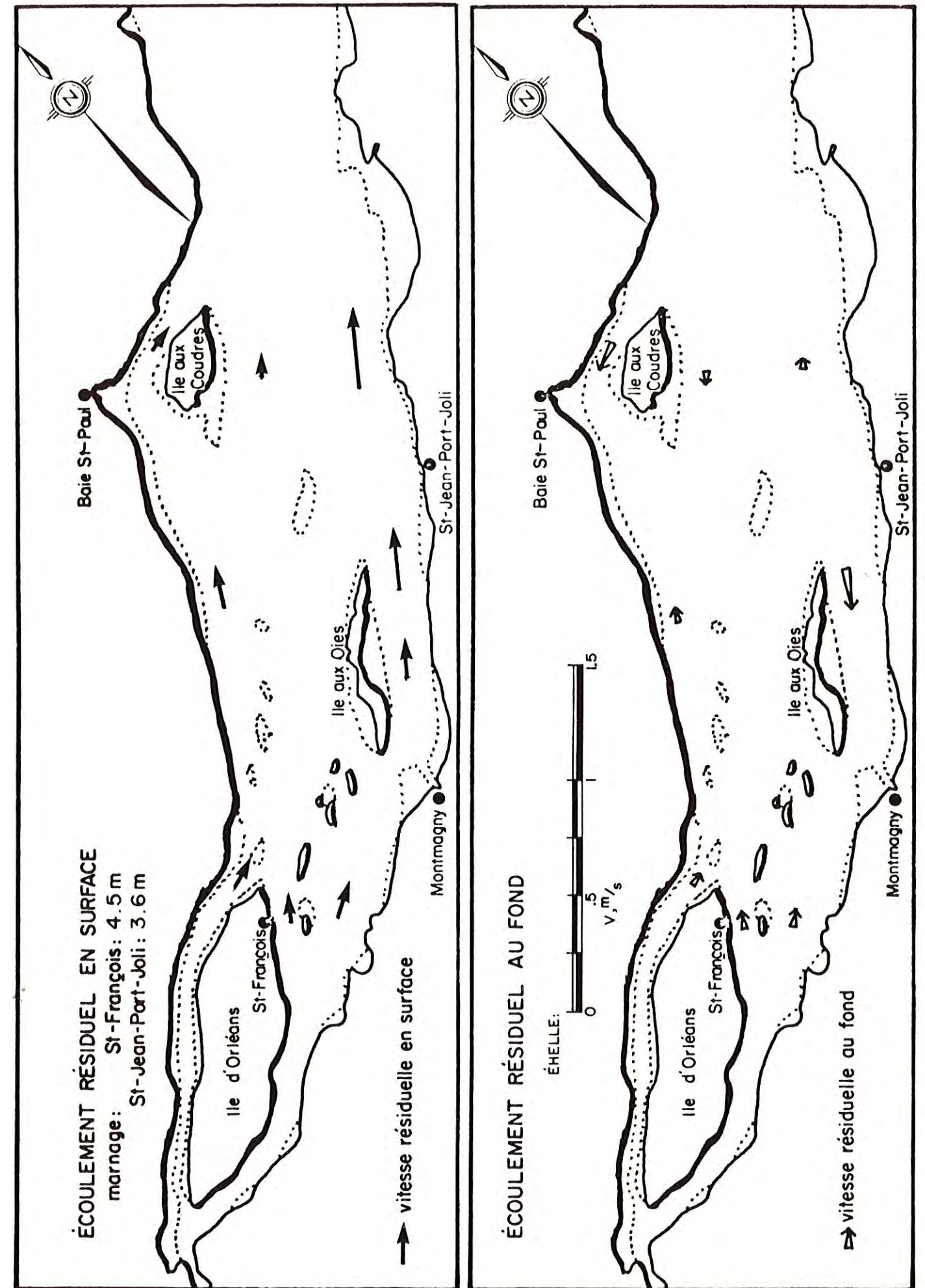


Fig. 5 — SCHEMA DE L'ÉCOULEMENT RÉSIDUEL LE 16 SEPTEMBRE 1971, MARÉE FAIBLE.

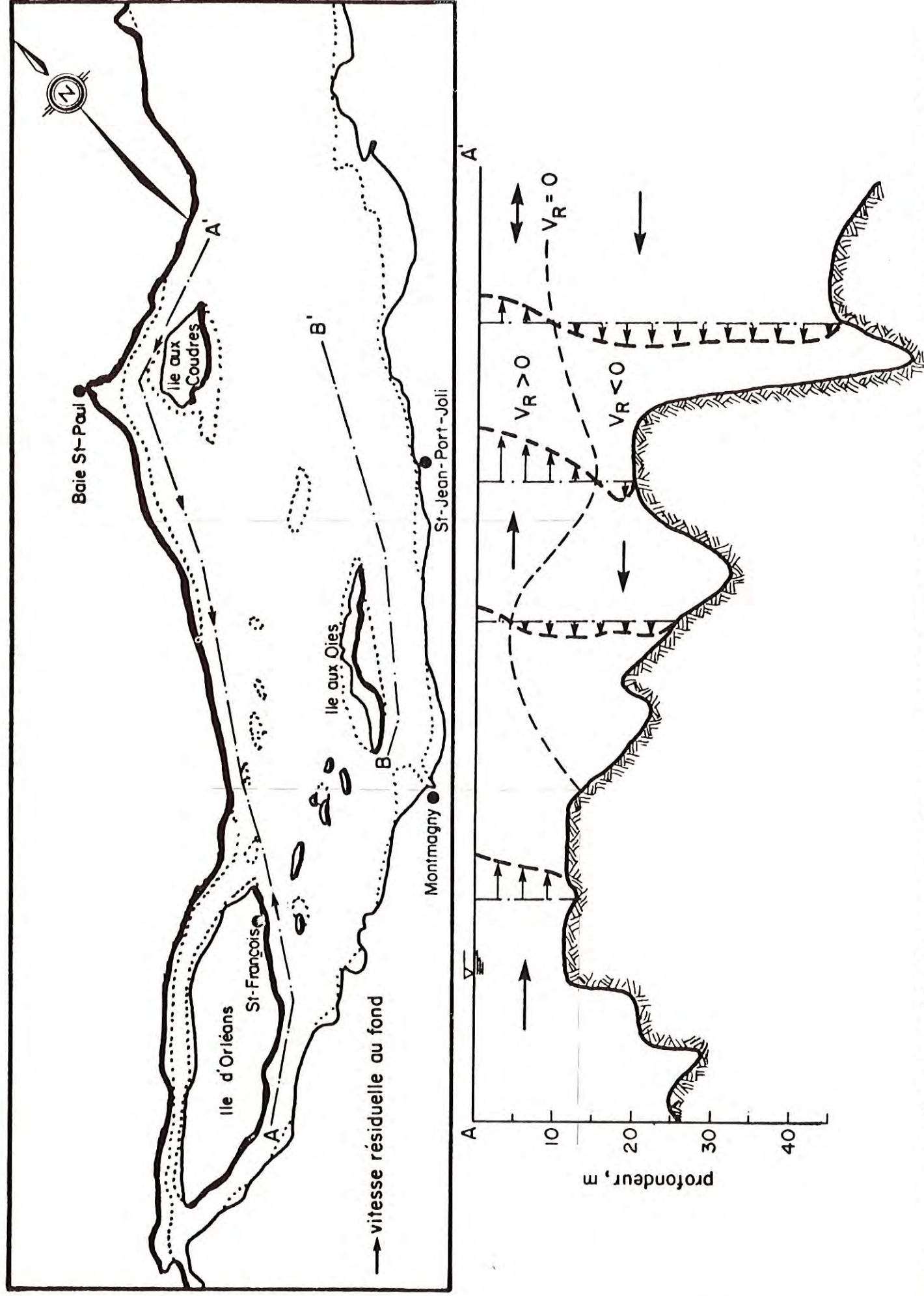


Fig. 6 - SCHEMA DE L'ÉCOULEMENT RÉSIDUEL ET GRADIENT DES VITESSES RÉSIDUELLES DANS LE CHENAL NORD ET LE BRAS SUD DE L'ILE D'ORLÉANS, FORTE AMPLITUDE DE LA MARÉE.

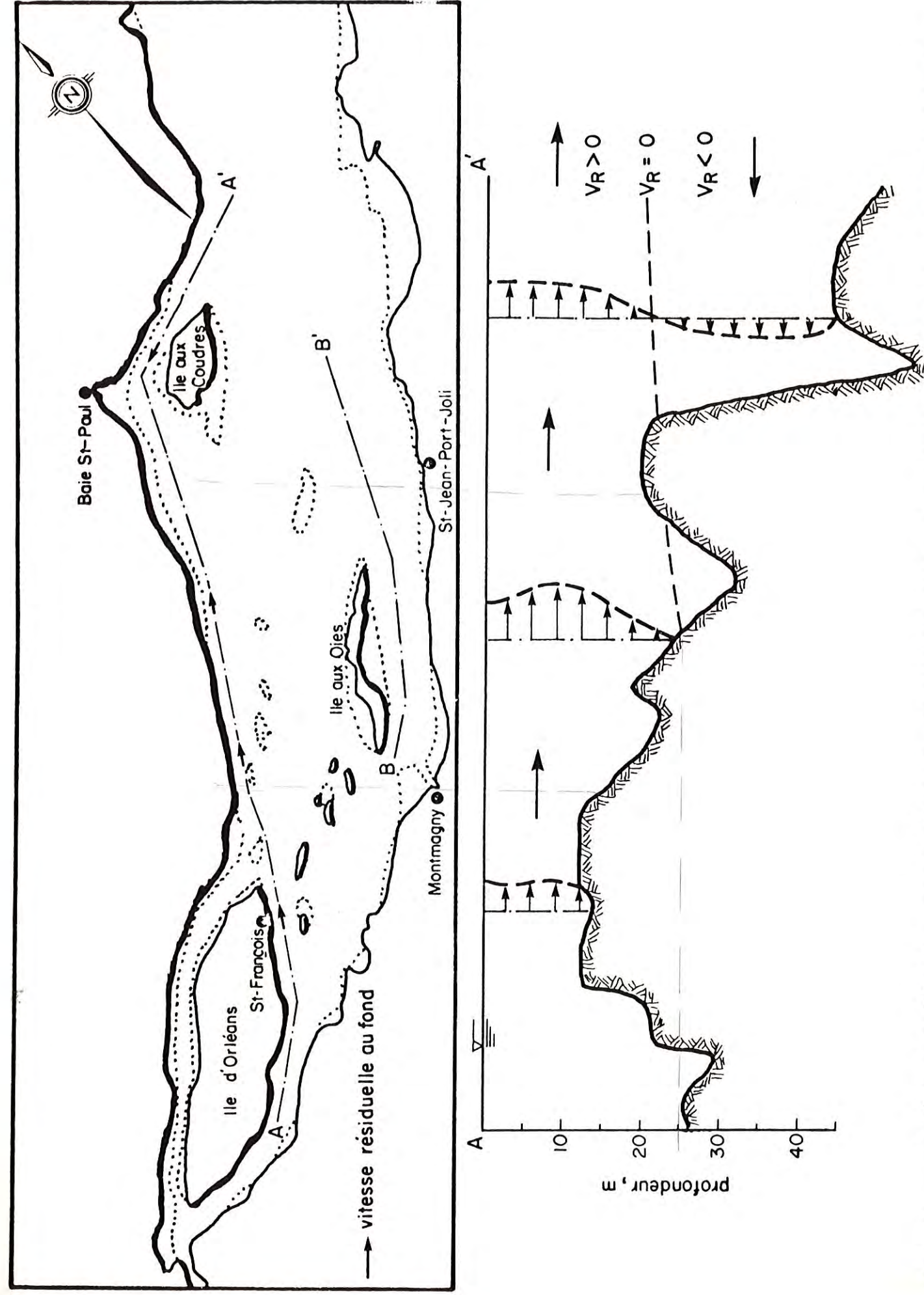


Fig. 7 - SCHEMA DE L'ÉCOULEMENT RÉSIDUEL ET GRADIENT DES VITESSES RÉSIDUELLES DANS LE CHENAL NORD ET LE BRAS SUD DE L'ILE D'ORLÉANS, FAIBLE AMPLITUDE DE LA MARÉE.

le chenal nord (chenal de navigation). Pour une marée forte, le point nodal des vitesses résiduelles se situe aux environs de Cap Brûlé. Pour chaque point en aval, l'écoulement résiduel au fond est dirigé vers l'amont. Cette limite supérieure correspond à l'élévation des fonds entre Saint-François et Cap-Tourmente qui contribue à limiter la pénétration saline. Le point nodal correspond sensiblement au point amont de l'intrusion saline à marée basse, c'est-à-dire, au point où la salinité présente un caractère permanent. Pour de faibles marées, le point nodal se déplace vers l'aval (de même que l'intrusion saline) et se situe aux environs de Sault-au-Cochon. L'écoulement peut présenter deux points nodaux, correspondant à deux zones à vitesse résiduelle amont situées dans des sections plus profondes, l'une entre Sault-au-Cochon et Petite Rivière, l'autre devant Baie-Saint-Paul. La remontée des fonds devant Petite Rivière peut produire un accroissement de la turbulence et une stratification saline moins prononcée qui diminuent l'écoulement résiduel au fond.

b) Chenal Beaujeu

La figure 8 montre l'évolution de l'écoulement résiduel dans le chenal Beaujeu. Le schéma se rapproche davantage de l'évolution idéale présentée en figure 2. Ceci provient du fait que ce chenal, par la présence de l'île aux Oies, est mieux caractérisé. De plus, l'évolution des fonds est

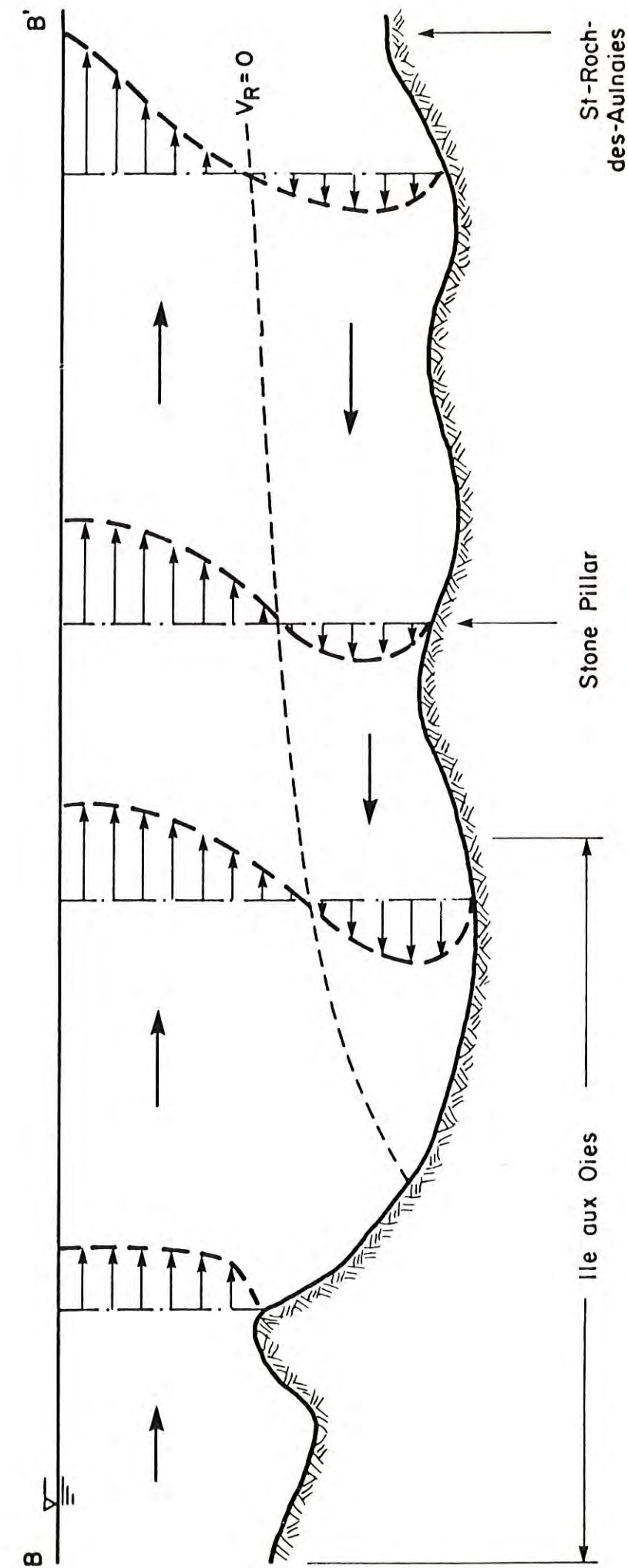


Fig. 8 - SCHÉMA DE L'ÉCOULEMENT RÉSIDUEL DANS LE CHENAL BEAUJEU.
SECTION B-B' DE LA FIG. III-4.

plus continue que dans le chenal nord. On constate également une grande stabilité du point nodal lors des variations de marnage autour d'une position moyenne située devant l'Anse à Gilles. La présence et la stabilité de ce point nodal tiennent un rôle important dans les processus sédimentaires s'exerçant dans cette zone en favorisant l'accumulation de sédiments fins.

3. Évolution transversale

a) Section Île aux Oies (fig. 9)

Les vitesses résiduelles sont dirigées vers l'amont dans les zones profondes des chenaux longeant la rive nord et la rive sud alors qu'au centre, l'écoulement est dirigé vers l'aval. Bien que les mesures dans la zone soient peu nombreuses, on peut dire que l'écoulement de flot s'effectue plutôt dans les chenaux bordant l'estuaire alors que le jusant "s'échappe" par la zone centrale.

b) Section Île aux Coudres (fig. 10 et 11)

L'écoulement résiduel amont au fond intéresse toute la section à l'exception du banc central et de la plate-forme bordant la rive sud. Le trait majeur des caractéristiques dynamiques de cette section semble être l'anomalie exprimée dans le profil vertical des vitesses résiduelles pour le bras sud de l'Île aux Coudres (fig. 3, JB-VI et 3S). À ce

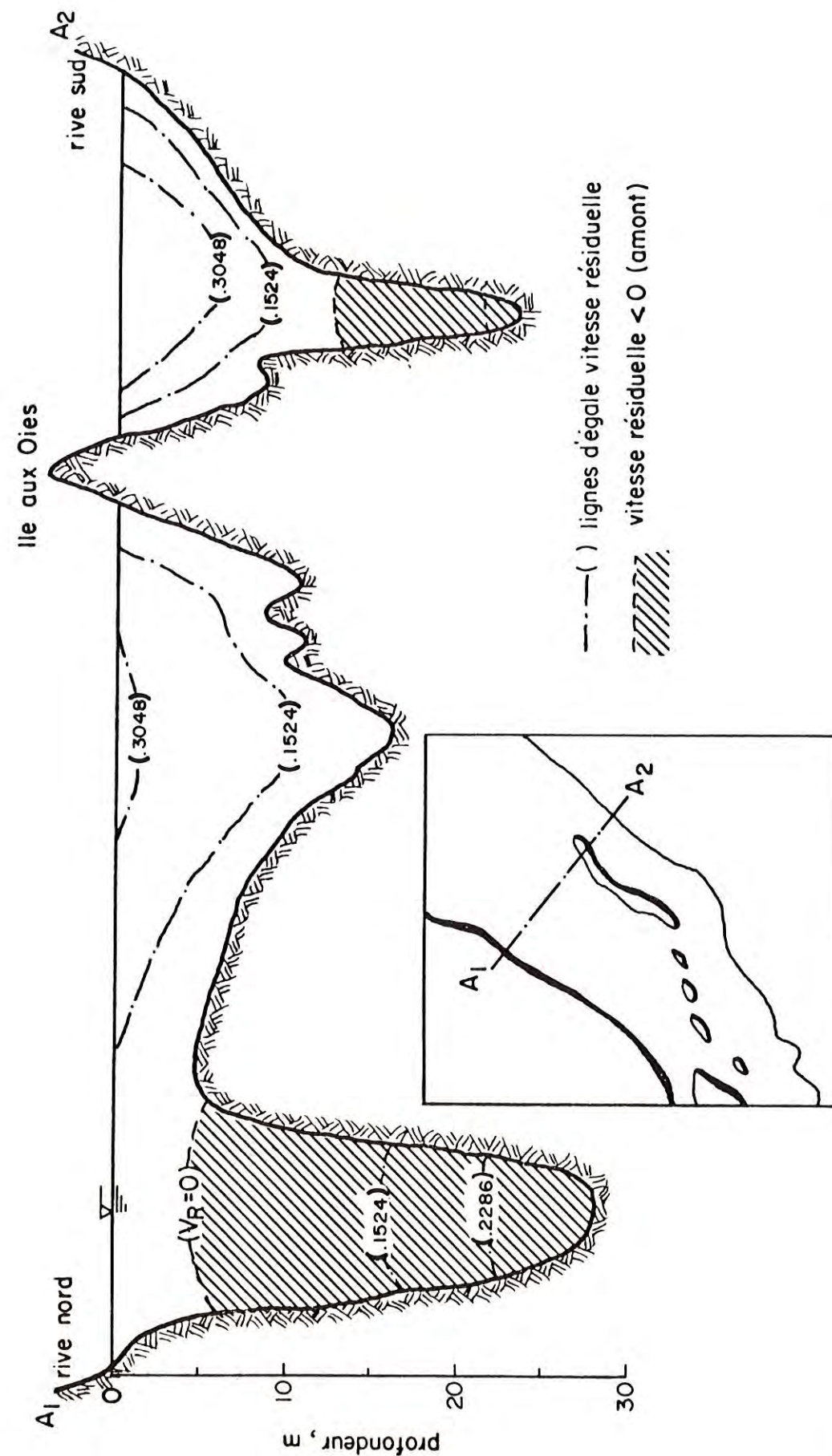


Fig. 9 - ÉVOLUTION TRANSVERSALE DES VITESSES RÉSIDUELLES.
SECTION DE L'ÎLE AUX OIES.

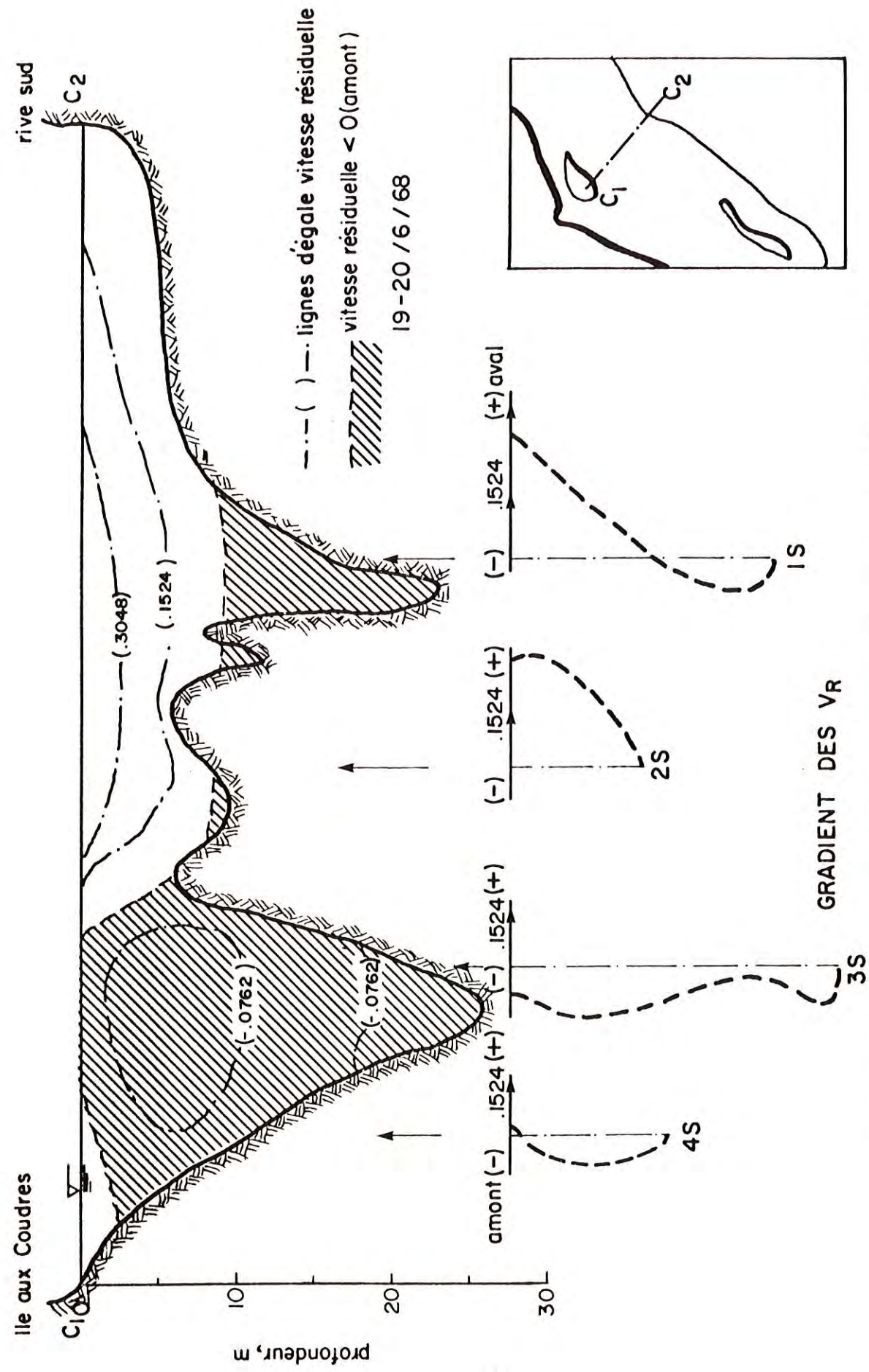


Fig. 10 - ÉVOLUTION TRANSVERSALE DES VITESSES RÉSIDUELLES. SECTION DE L'ÎLE AUX COUDRES.

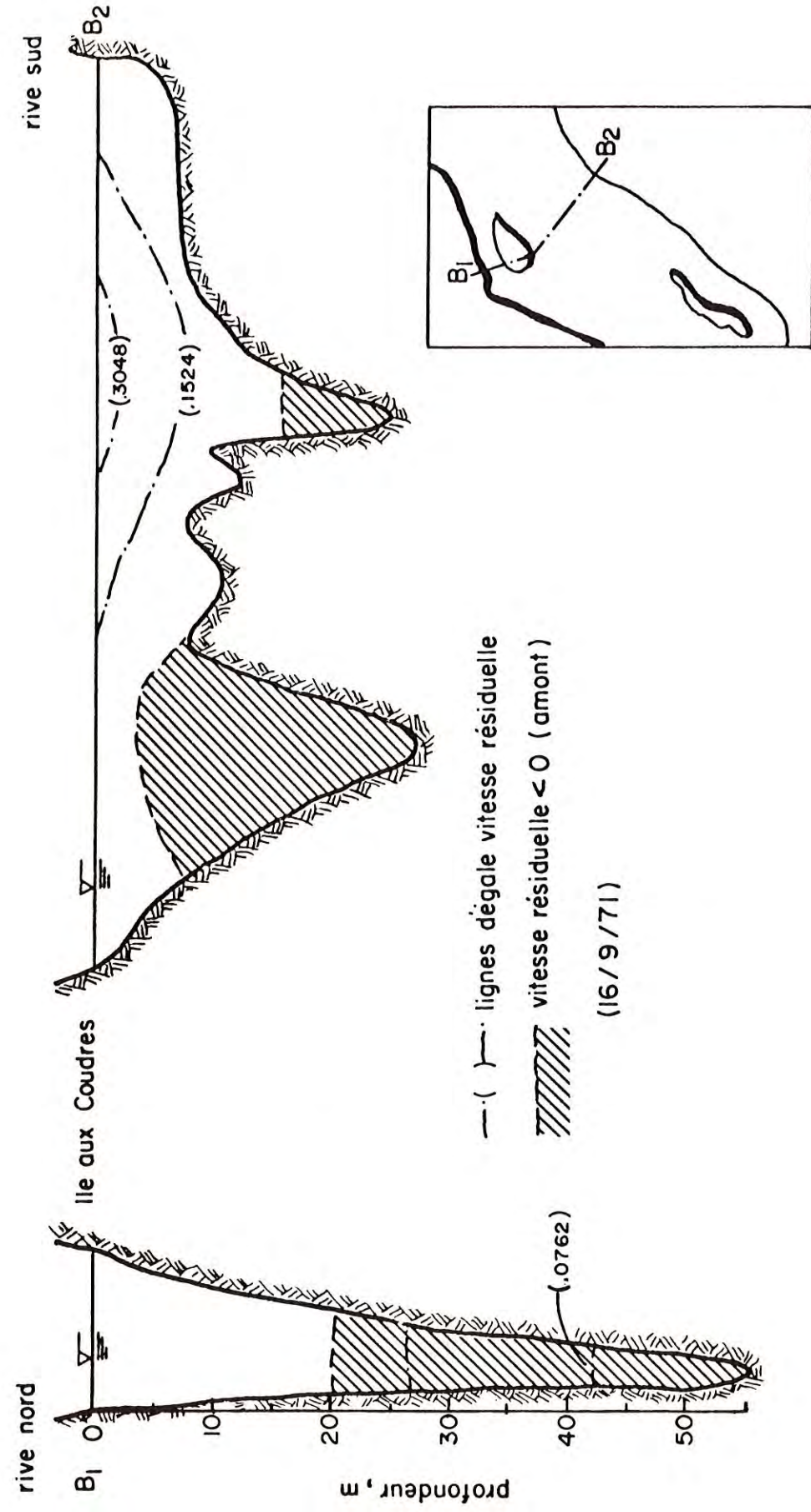


Fig. 11 - ÉVOLUTION TRANSVERSALE DES VITESSES RÉSIDUELLES. SECTION DE L'ÎLE AUX COUDRES.

point, les vitesses résiduelles sont dirigées vers l'amont sur toute la tranche de l'écoulement et d'une façon plus marquée dans les couches supérieures. Ce trait se retrouve aussi bien dans l'analyse des mesures de 1971 que dans celles de 1968 et de manière plus évidente lors des marées importantes.

Le phénomène est dû à la morphologie des fonds et notamment à la présence du banc des Coudres en amont qui défavorise l'écoulement de jusant, alors que le flot est bien alimenté par les zones plus profondes situées en aval. Dans cette zone à l'encontre des autres, la durée du flot est supérieure à celle du jusant (6 h. 25 min. pour le flot, 6 h. pour le jusant).

E) CONCLUSION

La circulation résiduelle dans la zone de mélange estuarienne du Saint-Laurent n'est pas seulement le fruit de la répartition de la salinité; bien que les gradients de densité soient l'élément majeur, elle est souvent influencée par la morphologie de l'estuaire qui contribue à différencier des écoulements préférentiels de flot et de jusant. D'autres facteurs peuvent aussi avoir une forte influence sur la circulation résiduelle, tel le vent (soit par l'entremise de la houle, soit en produisant des déplacements de masse) la force de Coriolis et l'inégalité journalière des marées. Cependant, le manque de données nous empêche d'en tenir compte.

II. LA STABILITÉ DES SUSPENSIONS DANS LES ESTUAIRES

A) BUT DE L'ÉTUDE

Les facteurs principaux qui agissent simultanément sur les suspensions sont les variations de salinité qui influencent la stabilité des particules et l'écoulement non permanent qui définit leur transport. Ce chapitre porte sur les interactions physico-chimiques des particules avec le milieu qui les entoure; l'association des résultats avec ceux déjà présentés sur la circulation résiduelle conduit à proposer le mécanisme d'entretien le plus probable du "bouchon de turbidité" dans l'estuaire du Saint-Laurent.

La stabilité d'une suspension se définit en chimie des colloïdes par l'observation directe ou indirecte du nombre de particules restant au sein du liquide après un temps donné. Pour que la sédimentation demeure négligeable, les particules doivent être très petites. En pratique, on observe que la stabilité est fortement dépendante des concentrations en composés ioniques ainsi que de la charge des ions, donc de la force ionique du liquide.

B) LA STABILITÉ COLLOÏDALE

Les particules de tailles inférieures, approximativement de trois micromètres, ont la propriété de développer à leur périphérie des forces qui peuvent dépasser en intensité celles dues à la pesanteur. On parle alors d'un comportement colloïdal des suspensions fines qui, sous l'influence d'un apport en composés ioniques, sont

capables de s'agglomérer les unes aux autres. Les flocons ainsi formés sont de dimensions très supérieures à celles des particules séparées, mais leur densité est plus faible, car de l'eau se trouve retenue entre les différents constituants solides.

Les forces qui se développent entre les colloïdes et qui empêchent ou favorisent la formation de flocons, sont indépendantes de la nature chimique ou de l'état solide des particules. Pour cette raison, ces forces ne peuvent être que d'origine électrique ou électronique.

Les forces d'attraction sont identiques, par leur nature électro-nique, aux forces de Van der Waals. Quant à la répulsion qui est due aux ions adsorbés à la surface des particules, elle correspond à une interaction électrique. C'est la résultante de ces deux forces antagonistes qui explique si une suspension reste stable, les particules demeurant alors indépendantes, ou bien s'il y a coagulation et agglomération des particules. Dans le premier cas, la résultante est une répulsion; dans le second, l'attraction est prépondérante.

La stabilité d'une suspension colloïdale de composition et de dimension homogènes a été traitée mathématiquement par Smoluchowski en supposant que toute force répulsive est disparue. L'attraction entre les particules se développe alors sans aucune limitation, conduisant à ce qu'on appelle une coagulation rapide. Le temps au

bout duquel le nombre de particules en présence initialement est divisé par deux, correspond au temps de coagulation T exprimé en secondes:

$$T = \frac{1}{4\pi DRv_0}$$

où D est la constante de diffusion des particules en cm^2/s ,

R est le rayon de collision en cm ,

v_0 est le nombre de particules par cm^3 .

Dans les suspensions naturelles, la taille des particules n'est pas constante et leur nature chimique peut varier ainsi que leur état de surface. De plus, les forces de répulsion persistent dans la plupart des cas, provoquant une coagulation retardée par rapport au cas théorique traité par Smoluchowski. Comme il est possible de déterminer directement le temps de coagulation par plusieurs procédés, on étudie ainsi la réaction des particules dans un environnement contrôlé. L'influence des paramètres significatifs tels que la turbulence, la salinité, le pH et la température peut alors être mesurée de façon pratique.

Pour comprendre le fonctionnement d'un système aussi vaste que celui de l'estuaire du Saint-Laurent, où les paramètres varient non seulement en fonction de la position, mais aussi avec le temps, un échantillonnage représentatif doit être effectué. Comme nous allons le voir, il est difficile de fournir des solutions pleinement satisfaisantes à un tel problème.

C) ÉCHANTILLONNAGE DES SUSPENSIONS

Pour étudier la réactivité des particules dans les estuaires réels, il est nécessaire d'utiliser des suspensions naturelles, principalement à cause des interactions qui se manifestent entre des particules de natures différentes (Whitehouse and Jeffrey, 1954). Pour cette raison, des suspensions originaires de l'estuaire ont été employées dans toutes les expériences réalisées.

Cette méthode présente néanmoins l'inconvénient d'introduire des inconnues qui peuvent avoir leur importance: c'est le cas des matières organiques qui, même à faible concentration, influencent fortement la taille des flocons (Kranck, 1973). L'existence de matières organiques fixées sur les suspensions naturelles introduit probablement des variations saisonnières dans le comportement des particules. En été, les matières organiques vivantes se développent normalement dans l'estuaire alors qu'en hiver, leur croissance est arrêtée. Ce genre de variation dans les suspensions naturelles est pratiquement insaisissable même si ses conséquences sont importantes pour la stabilité des suspensions.

Le second problème relatif à l'étude des suspensions naturelles provient de la durée qui sépare l'échantillonnage de la mesure. Pendant tout ce temps, l'échantillon n'est plus soumis à la turbulence du milieu naturel, mais à une agitation différente due au

transport et une fois sur le lieu de mesure, il est laissé entièrement au repos. Il peut être également difficile de le maintenir à sa température initiale. Enfin, si le temps qui sépare l'échantillonnage de la mesure atteint plusieurs jours, de fortes variations dans la taille des particules sont à craindre. Sheldon, Evelyn and Parsons (1967) indiquent que des agrégats de bactéries, pouvant atteindre des diamètres de $4\mu\text{m}$, se forment en 24 heures dans de l'eau de mer filtrée. Pour éviter ce dernier problème, il faut donc que la mesure soit effectuée peu de temps après l'échantillonnage. Pour la plupart des mesures effectuées, cette contrainte a été respectée. Dans certains cas, de la gélatine était ajoutée à la suspension au moment du prélèvement pour bloquer son évolution ultérieure.

Les mesures effectuées, qui apparaîtront au chapitre suivant, rendent compte de la réactivité des particules naturelles en provenance du Saint-Laurent. Leur comportement reproduit ce qui se passe dans l'estuaire beaucoup mieux que ne peut le faire une suspension artificielle, mais toute généralisation des résultats ne pourra être faite qu'avec prudence à cause des problèmes mentionnés.

D) TECHNIQUES DE MESURE UTILISÉES

Pour observer la stabilité des particules en suspension, trois méthodes ont été utilisées: la microscopie électronique pour déterminer principalement la taille des particules non agglomérées,

le compteur Coulter pour observer la distribution des tailles des particules et enfin, une méthode nouvelle d'ultramicroscopie, utilisant comme source lumineuse un laser continu de forte puissance. Les photographies des particules, obtenues avec un minimum de perturbation, ont permis de suivre leur réactivité sous l'influence de divers paramètres physico-chimiques.

1. Le microscope électronique

Le microscope électronique permet de voir toutes les particules en suspension grâce à sa forte résolution. Il est alors possible d'estimer l'importance relative des petites particules pour les observer; des précautions doivent être prises pour éviter toute transformation de l'état des suspensions.

2. Le compteur Coulter

Le compteur Coulter permet le comptage des particules en suspension par un procédé électronique. La solution contenant les particules à étudier est rendue conductrice par un sel (tel que NaCl à 10%) et un courant électrique est établi entre deux électrodes. Le circuit est tel que le courant passe par une petite ouverture dont le diamètre est de cinq à dix fois celui des particules à mesurer. La solution est aspirée à travers cette ouverture et lorsqu'une particule passe, elle prend la place d'un volume égal de solution conductrice. Le circuit électrique présente alors une variation de résistance proportionnelle au volume de la particule.

Ce signal est amplifié, puis classé en fonction de ses caractéristiques. Le comptage ainsi obtenu est très rapide: il permet de différencier et de classer jusqu'à 5 000 particules par seconde, ce qui représente l'avantage principal de cette méthode. L'inconvénient majeur réside dans la forte turbulence entourant l'ouverture qui peut détruire facilement les agglomérats de particules.

Pour des raisons pratiques, les particules à mesurer doivent être comprises entre 2% et 40% du diamètre de l'ouverture utilisée. Avec une ouverture de 50 μ m, les particules de 1 à 20 μ m seront donc classées correctement et il ne sera pas possible d'obtenir de renseignements exacts sur les particules plus petites ou plus grosses.

3. L'ultramicroscope

L'ultramicroscopie est la dernière méthode possible. Elle nécessite l'utilisation d'un microscope optique dont le faisceau incident éclairant les particules ne pénètre pas dans le tube de l'appareil, mais est en fait perpendiculaire à son axe optique. Les particules observables, grâce à cette technique, sont beaucoup plus petites que celles visibles en microscopie optique classique. Par contre, leur forme et leur taille ne sont pas observables directement.

Lors de la mesure, la perturbation subie par la suspension est très réduite par rapport au microscope électronique et au compteur Coulter. C'est pour cette raison que nous avons cherché à l'adapter correctement à nos besoins.

La lumière diffusée par les particules dans la direction du microscope intervient seule et fait apparaître les particules comme des points lumineux. La difficulté est d'obtenir une lumière incidente fortement concentrée et d'intensité suffisante pour que ces points lumineux deviennent photographiables en utilisant un film sensible. C'est pourquoi, nous avons utilisé un laser continu à Argon et un film très sensible de 3 000 ASA. La détermination du nombre de particules à un moment donné conduit alors à définir la vitesse de coagulation des particules naturelles dans un environnement dont on peut fixer certains paramètres pour en étudier l'influence.

E) COMPORTEMENT DES SUSPENSIONS

Dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent, deux séries d'échantillonnage ont été réalisées pendant les étés 1974 et 1975 sur la région allant de Québec à l'embouchure du Saguenay. Durant l'hiver, pour des raisons d'ordre pratique, seule la région de Québec a été échantillonnée.

L'eau prélevée en surface sans l'utilisation de pompe était ensuite versée dans des bouteilles en polyéthylène et conservée ainsi à la température ambiante jusqu'à l'arrivée au laboratoire. Les analyses étaient ensuite effectuées le plus rapidement possible pour éviter tout vieillissement des suspensions dans des conditions éloignées de leur milieu naturel.

L'observation des photographies, prises au microscope électronique, montre que les particules inférieures à $1\mu\text{m}$ sont aussi nombreuses que celles dont la taille dépasse cette valeur. Ceci est valable pour des échantillons provenant d'eaux de surface du Saint-Laurent dans une région proche de Québec et non soumise aux variations de salinité.

La limite de $1\mu\text{m}$ correspond en pratique aux dimensions minimales mesurables au compteur Coulter muni d'une ouverture de $50\mu\text{m}$, telle que celle qui fut utilisée pour la plupart des mesures. Les résultats obtenus au compteur Coulter apparaissent alors comme amputés d'une partie importante de leur signification puisque les particules les plus fines qui ne peuvent être comptées sont les plus actives en coagulation.

Pour étudier la coagulation, l'ultramicroscopie est une méthode très supérieure au compteur Coulter. Mais sa supériorité est limitée strictement à ce domaine, car aucun renseignement autre

que le nombre total de particules ne peut être obtenu dans ce cas. Le compteur Coulter, qui différencie les particules en fonction de leurs tailles, permet de suivre la coagulation non plus globalement, mais d'une catégorie de particules à une autre. Il faut enfin remarquer que la perte d'information sur les petites particules, lors de leur comptage, se réduit à de très faibles proportions si les volumes des particules sont plus importants que leur nombre.

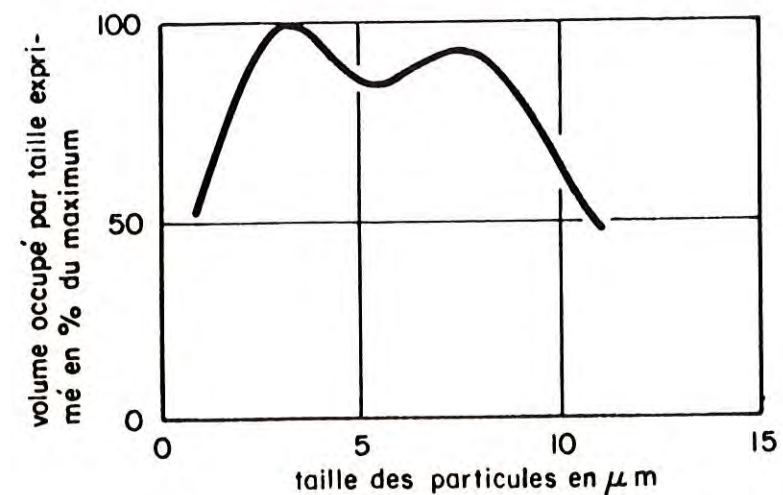
En fournissant des renseignements différents sur les suspensions, le compteur Coulter et l'ultramicroscope se complètent et il est intéressant de les étudier simultanément.

1. Campagne de mesure de l'été 1974

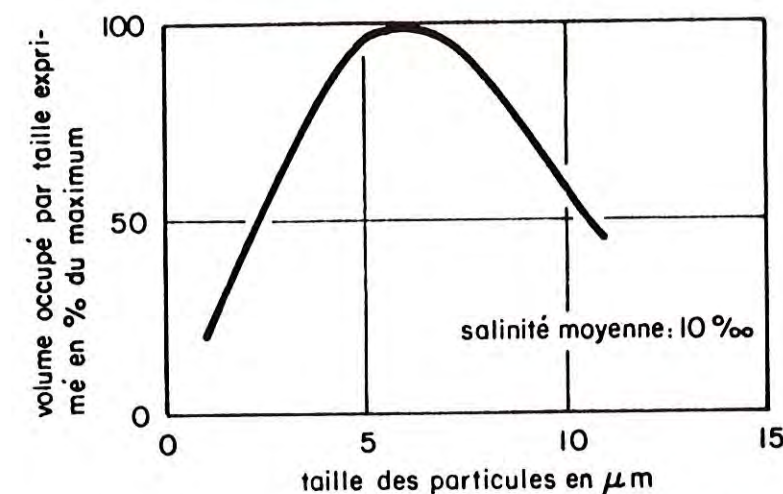
L'analyse au compteur Coulter des échantillons prélevés dans l'estuaire pendant l'été 1974 est représentée en figure 12 où le volume total des particules est tracé en fonction de leur taille. Pour faciliter les comparaisons, le volume maximum a été ramené dans chaque cas à 100%.

Région de Québec

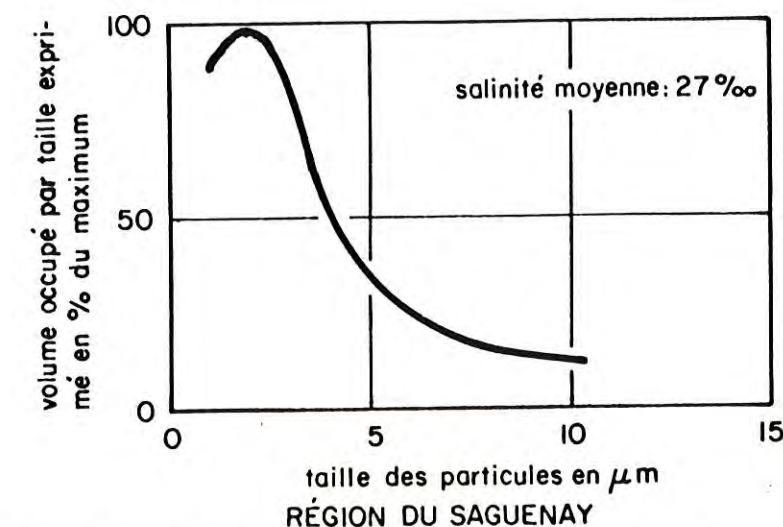
Dans cette région, les particules avant de pénétrer dans la zone salée de l'estuaire, se répartissent en général suivant une courbe possédant plusieurs modes et aucune taille ne semble particulièrement favorisée par rapport aux autres. En hiver cependant, les tailles des particules observées sont



RÉGION DE QUÉBEC



RÉGION DE L'ÎLE AUX COUDRES



RÉGION DU SAGUENAY

Fig.12 - DISTRIBUTION TYPIQUE DES VOLUMES DE PARTICULES D'UNE TAILLE DONNÉE À DIFFÉRENTES SECTIONS DE L'ESTUAIRE DU ST-LAURENT.

inférieures à celles mesurées en été. Les particules en suspension, au niveau du haut estuaire, ont déjà subi une certaine coagulation en eaux douces et elles se présentent sous la forme de flocons regroupant plusieurs particules élémentaires. Les sels contenus en faibles quantités dans les eaux du fleuve, dont la conductivité atteint $230\mu\Omega^{-1}/\text{cm}$ en moyenne, produisent une certaine déstabilisation des particules qui permet d'expliquer la formation des flocons, favorisés également par la présence de matières organiques provenant des nombreuses sources d'eaux usées rejetées dans le Saint-Laurent.

Région de l'Île aux Coudres

Dans l'estuaire moyen, où la salinité est très variable et la turbulence forte sous l'effet des marées, la distribution des particules ne présente plus qu'un seul mode très bien développé. L'hydrodynamique détruit les gros flocons déjà formés tandis que sous l'influence de la salinité, les particules fines se déstabilisent de façon marquée pour former des flocons d'une taille comprise entre 5 et $10\mu\text{m}$. L'augmentation de la force ionique de la solution permet aux particules fines de former des liaisons lorsque leur réactivité est supérieure à celle des flocons. Il en résulte une diminution des particules les plus fines.

Si la taille des flocons n'augmente pas plus qu'il n'est observé, c'est parce que les forces de liaison qui maintiennent les particules ensemble sont relativement faibles. Les plus gros flocons sont détruits par la turbulence locale qui, au-delà d'une certaine taille, est capable de développer des efforts tangentiels suffisants pour provoquer la rupture des liaisons et la formation de plusieurs flocons de tailles inférieures. Un équilibre s'établit alors entre la formation et la destruction des flocons, ce qui conduit à un mode unique et bien développé dans la distribution des particules en suspension, comme nous l'avons observé.

Région du Saguenay

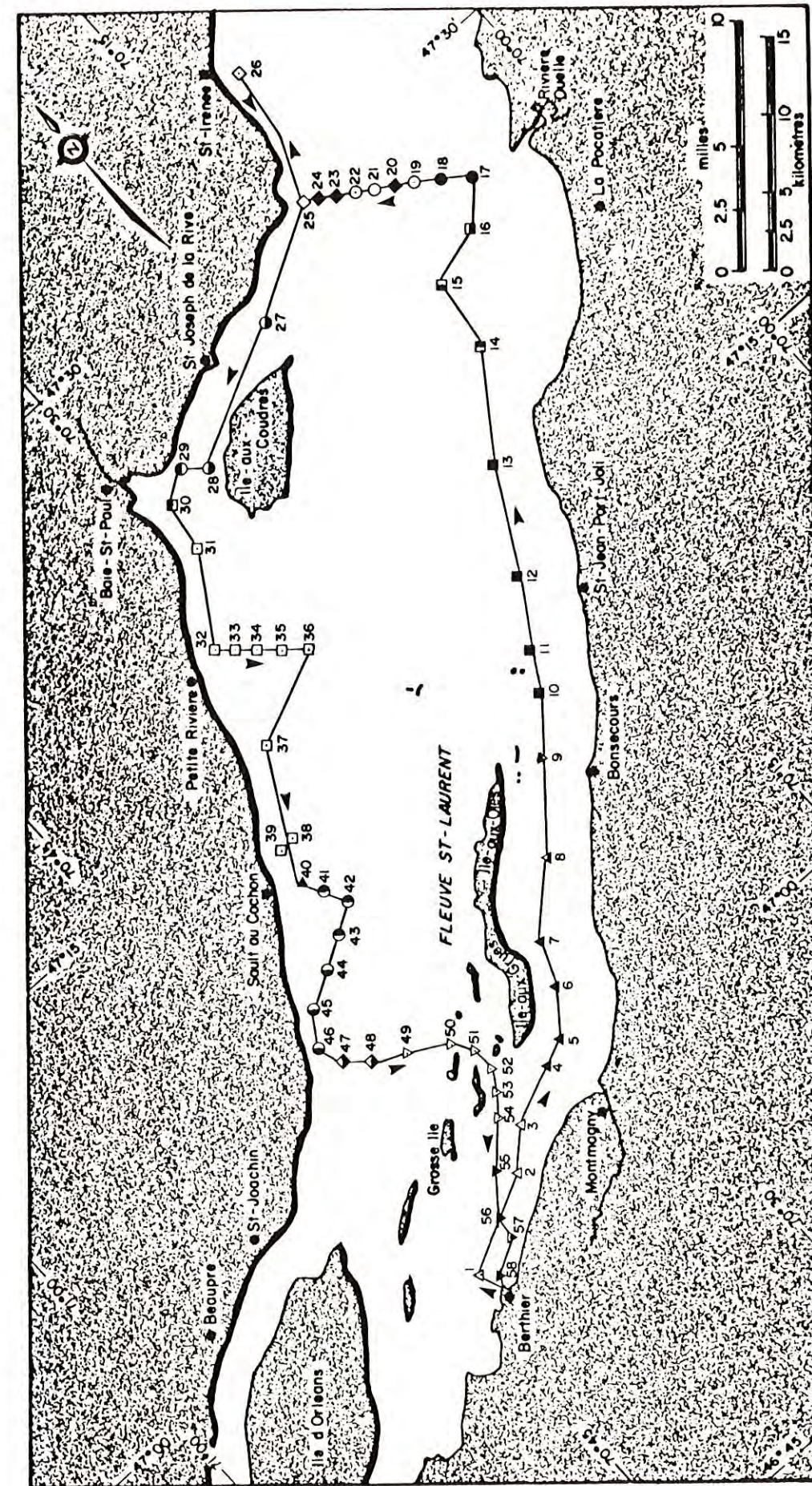
La salinité moyenne étant plus élevée que précédemment, la distribution des particules devrait normalement se déplacer vers la formation de flocons plus gros, car la turbulence est du même ordre de grandeur dans ces sections. Or, la distribution obtenue ne ressemble en rien à la précédente ou à celle qu'il aurait été normal d'observer: le nombre de petites particules y est au contraire plus élevé. Ce comportement, qui s'éloigne beaucoup de ce qui se produit habituellement en chimie des colloïdes, indique l'importance de facteurs autres que physico-chimiques. Ce dernier point sera repris en détail au chapitre III.

2. Échantillonnage effectué en juillet 1975

Les 58 échantillons de suspensions naturelles prélevés lors de la campagne de mesure des 7 et 8 juillet 1975, nous ont permis de compléter les résultats déjà obtenus. Des analogies importantes existent entre les différentes distributions de tailles des particules observées. Il est donc possible de définir des masses d'eau homogènes en relation avec ce paramètre, tel que le montre la figure 13, où des distributions voisines sont représentées par le même symbole.

Plusieurs distributions types apparaissent en figure 14. La différence la plus importante par rapport à la campagne de l'été 1974 est la taille du mode pour les particules échantillonnées en eau douce. Celle-ci varie de 15 à 20 μ m, à comparer avec 7 μ m (septembre 1974) et 1 μ m (février 1975). Il semble qu'un des paramètres très importants de la coagulation réside dans la température de l'eau ou dans les effets des éléments organiques qui peuvent dépendre directement de la température.

La figure 14 représente la taille des modes en fonction de la salinité. Trois zones différentes y sont visibles. La première est située aux salinités allant de 0 à 3‰, où les particules ayant des tailles supérieures à 15 μ m semblent se détruire dans la zone de mélange des eaux douces et des eaux salées. Cette caractéristique peut ne pas apparaître si la taille des



Note: Des signes identiques indiquent des distributions de particules ayant même mode et même forme.

Fig. 13 - POSITION DES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS LES 7 ET 8 JUILLET 1975.

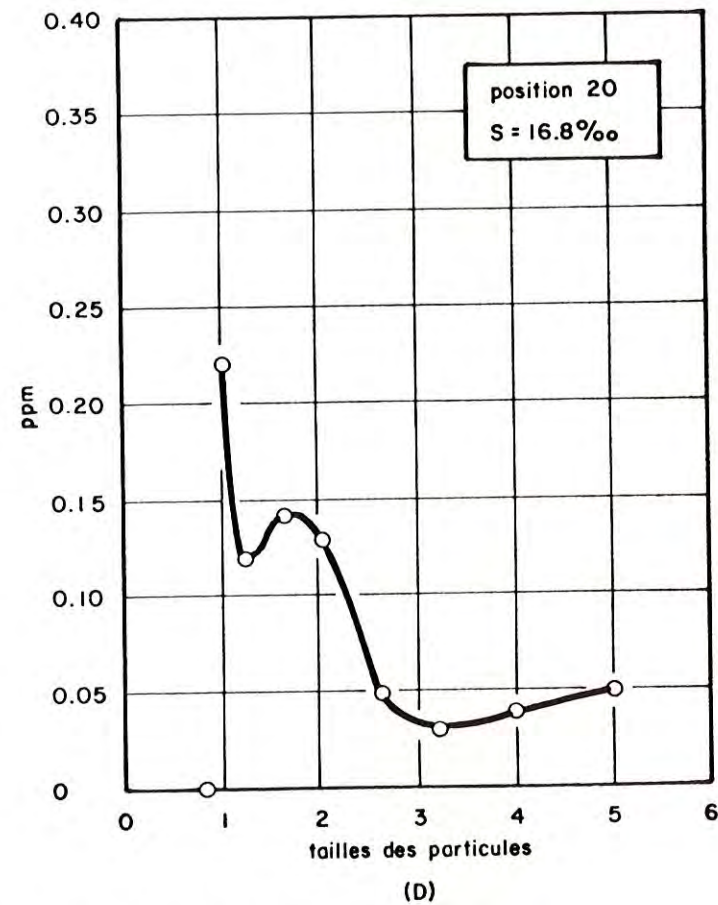
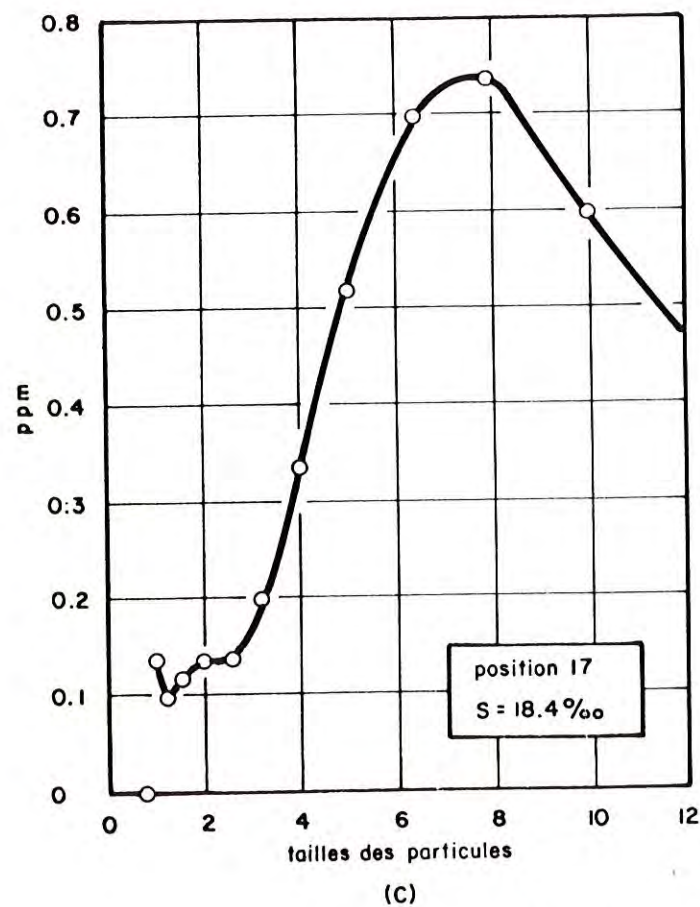
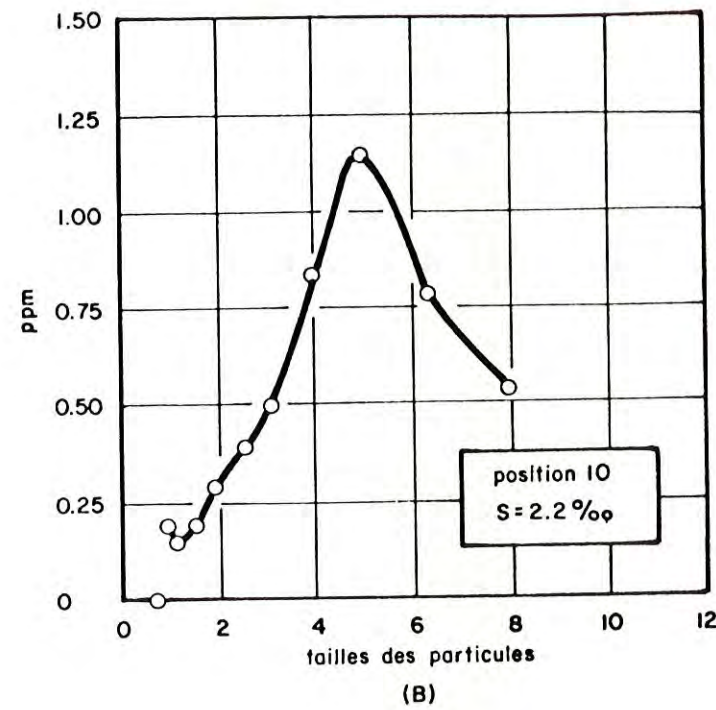
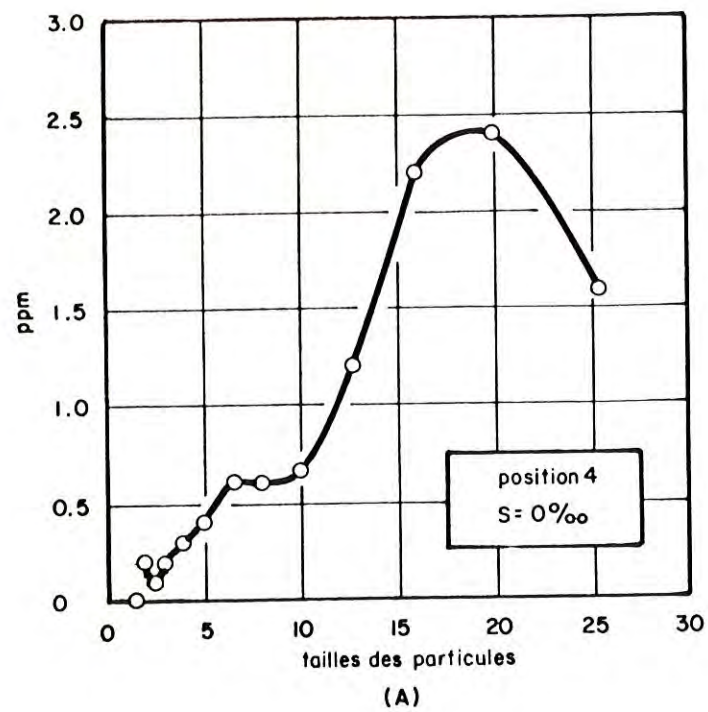


Fig. 14 - RÉPARTITIONS TYPES DES TAILLES DES PARTICULES.

flocons en eau douce reste faible. La seconde zone comprend les salinités variant entre 3 et 10‰. La coagulation y produit une augmentation de la taille moyenne des particules de 7 à 8 μm. Comme les chiffres l'indiquent, l'efficacité de la coagulation dans l'estuaire du Saint-Laurent reste très faible ou encore, elle se trouve fortement minimisée par les effets dynamiques de la zone de mélange. La dernière zone regroupant les salinités supérieures à 10‰ ne se distingue pas nettement de celle qui s'étend de 3 à 10‰, lorsqu'on considère la figure 14. Néanmoins, les types de répartition des tailles des particules ont permis de différencier plusieurs masses d'eau en supposant que deux distributions semblables n'ont pu évoluer de cette façon que par un cheminement identique dans l'estuaire. Cette division de la partie centrale de l'estuaire moyen en masses d'eau différenciables est peut-être à rapprocher des résultats obtenus par télédétection (voir chapitre III).

Une autre catégorie de suspensions apparaît dans le chenal maritime, de Sault-au-Cochon à l'Île aux Coudres, où le mode est situé aux environs de 8 μm. Dans ce cas, la salinité varie pourtant de 7 à 17‰, mais les particules se présentent de façon relativement homogène et, à ce qu'il semble, presque indépendamment de la valeur de la salinité.

Ces résultats, obtenus en nature, sont complétés par une série de mesures effectuées en laboratoire sur des suspensions originaires de l'estuaire dans le but de faciliter l'interprétation des observations réalisées.

3. Études en laboratoire

Nous avons cherché plus particulièrement à établir si l'évolution de la taille des particules observée entre l'amont et l'aval de l'estuaire pouvait être reproduite.

Pour cela, à l'instant initial, une solution concentrée de NaCl ou d'eau de mer synthétique était ajoutée à un litre d'eau du Saint-Laurent de façon à ce que la salinité atteigne au minimum 8‰. La solution était ensuite mesurée à intervalles de temps réguliers à l'aide du compteur Coulter ou de l'ultramicroscope.

Dans l'exemple représenté en figure 15, l'évolution se produit relativement vite et en trois heures, la distribution montre déjà une forme assez semblable à celle qui sera obtenue deux jours après. Le temps de réaction des particules aux variations de salinité est donc très court comparé à la durée du séjour des suspensions dans l'estuaire estimé au minimum à un mois. Les particules se mettent en équilibre graduellement avec l'augmentation de la salinité, car des variations de l'environnement

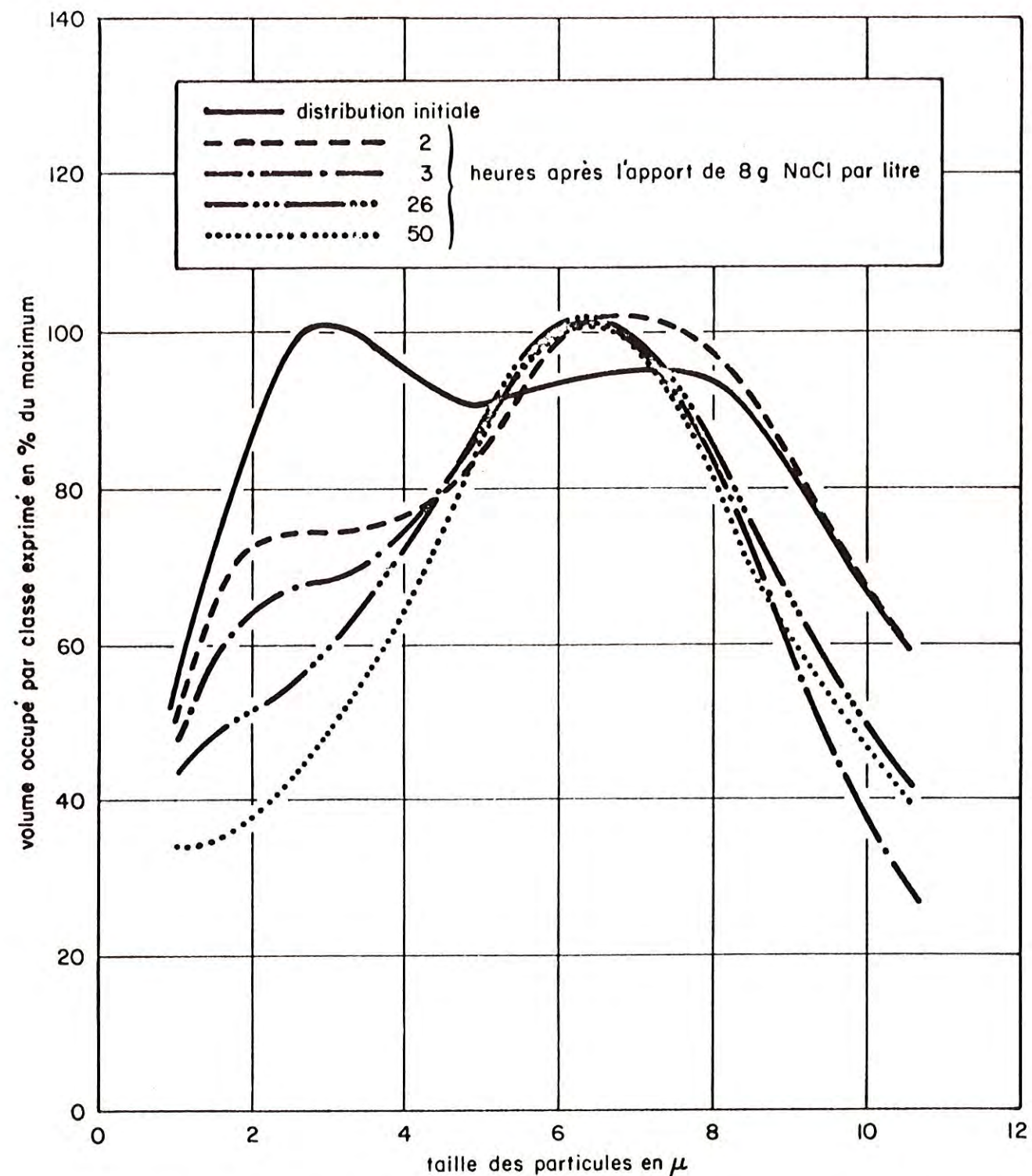


Fig. 15 - INFLUENCE D'UNE VARIATION DE LA FORCE IONIQUE SUR LE COMPORTEMENT D'UNE SUSPENSION. RÉGION DE QUÉBEC. (SI)

ionique, aussi brutales que celles étudiées en laboratoire, ne peuvent pas se produire en nature sur des suspensions. Un deuxième type d'expérience a consisté à ajouter à une même suspension des quantités variables de sels de façon à varier l'environnement ionique des particules d'un échantillon à l'autre. Les résultats des mesures faites deux semaines après l'apport apparaissent en figure 16.

Les modes obtenus ainsi que le volume occupé par les plus petites particules varient avec l'environnement ionique:

<u>Solution initiale</u>	<u>Mode</u>	<u>Volume des petites particules en % du volume maximum</u>
Solution à 5%	5.3 μm	11
Solution à 10%	7.3 μm	5
Solution à 20%	7.3 μm	7
Solution à 35%	5.8 μm	22

La solution la plus salée conserve un nombre de petites particules nettement supérieur aux trois autres solutions. Ceci revient à dire que la stabilité des petites particules est assurée par des forces de répulsion qui ont pu se développer jusqu'à un certain point. Mais la destruction des gros flocons ne se produit pas pour autant.

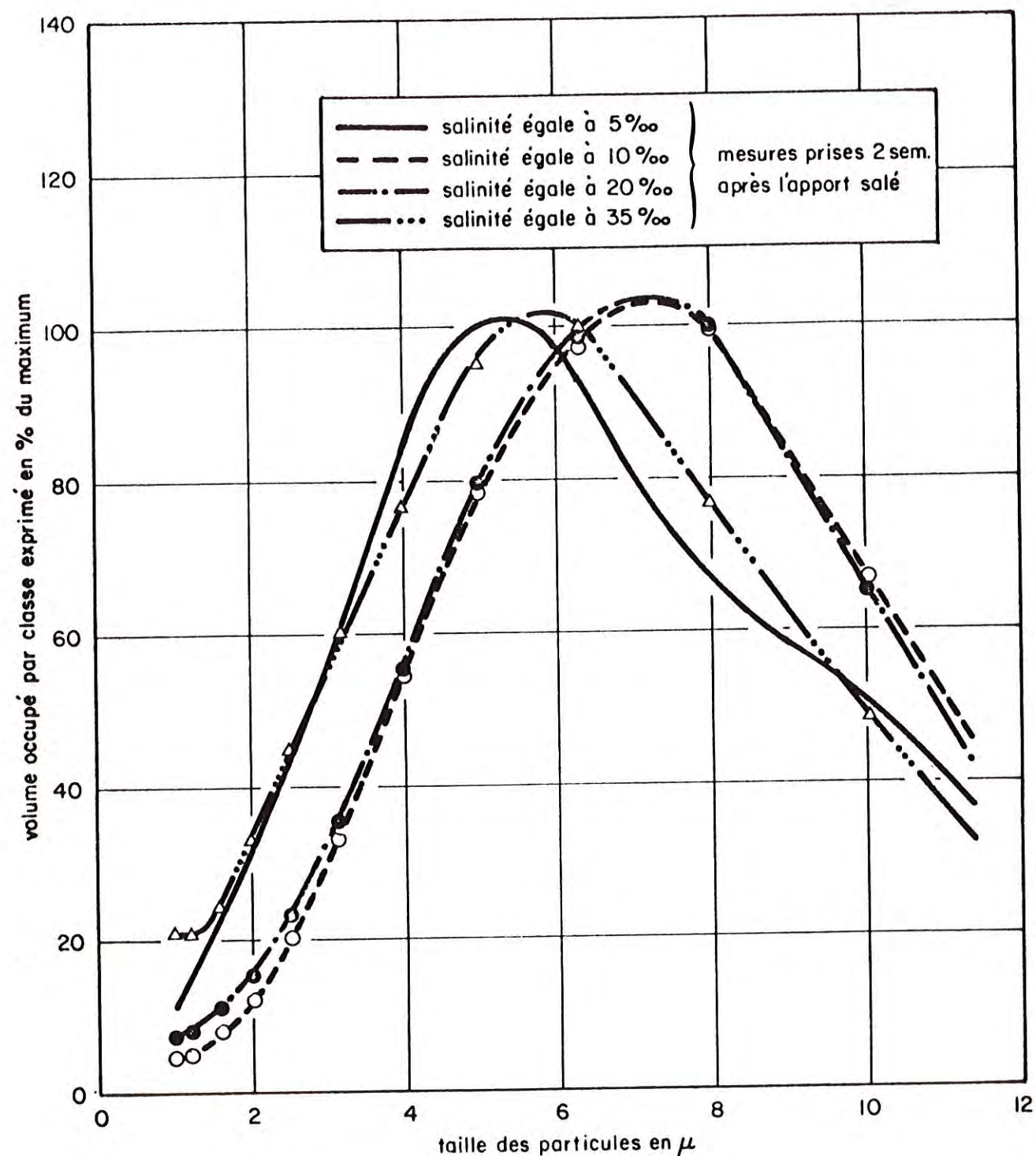


Fig. 16 - INFLUENCE À LONG TERME D'UNE VARIATION DE LA FORCE IONIQUE DU MILIEU SUR UNE MÊME SUSPENSION.

Les courbes relatives à 10‰ et à 20‰ se superposent presque exactement montrant ainsi que leurs influences sont similaires. Ceci s'observe en nature dans le chenal maritime en amont de l'île aux Coudres. La comparaison des résultats montre qu'il semble exister une salinité telle que, pour les suspensions naturelles étudiées ici, la coagulation passe par un maximum d'efficacité. Au-delà de ce seuil, une augmentation de salinité ne facilite plus la formation de flocons mais, au contraire, limite cette évolution.

Alors que le compteur Coulter s'avère particulièrement bien adapté à toutes les mesures qui précèdent, nous avons vu que ce n'est pas une méthode qui se prête aux calculs des temps de coagulation. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser l'ultramicroscope.

Le but poursuivi est alors de compter le nombre de particules en suspension dans un volume donné sans introduire d'erreurs. L'échantillon est placé, sans aucune modification, dans une cellule en verre, observable à l'aide d'un microscope. L'éclairage incident, particulièrement intense, produit un échauffement local dans la solution, ce qui provoque des courants de convection. Soumises à des mouvements incessants, les particules ne peuvent être comptées que si elles sont photographiées.

Pour que les particules apparaissent comme ponctuelles, le temps de pose doit être de l'ordre du trentième de seconde. En fait, les courants de convection sont faibles, mais le déplacement apparent des particules dépend du grossissement du microscope utilisé pour l'observation. Un faisceau incident très énergétique et un film très sensible de l'ordre de 3 000 ASA sont nécessaires pour obtenir des photographies suffisamment contrastées.

La faible profondeur de champ du microscope impose un diamètre du faisceau lumineux très petit pour que toutes les particules éclairées soient nettes et apparaissent sur un fond sombre. Il est alors nécessaire de concentrer le faisceau par l'intermédiaire d'une lentille ou d'un système de lentilles pour le rendre suffisamment fin.

Les courants de convection qui se développent sous l'influence du faisceau lumineux varient suivant les distances aux bords de la cellule et à la surface supérieure du liquide. Le nombre des particules, tout comme la vitesse et la direction des courants de convection, changent suivant la position observée. Pendant une série de mesures, il est donc nécessaire d'éclairer la cellule toujours au même endroit.

Le comptage des particules a été effectué sur les photographies, telles que celles présentées en figure 17. Le nombre obtenu correspond à un temps de coagulation d'une heure et un quart (avec une précision estimée à 30%). Cette coagulation a été produite par une variation de la salinité de la solution passant de 0 à 8‰, à l'instant initial. Nous retrouvons ici un résultat déjà obtenu avec le compteur Coulter indiquant que les particules ont la possibilité de se mettre en équilibre avec le milieu environnant au bout d'un temps relativement court.

F) CONCLUSION

En laboratoire, la coagulation des suspensions originaires de l'eau douce se compare à celle observée dans l'estuaire réel pour toute la partie située à l'amont de l'île aux Coudres:

- Une suspension à plusieurs modes devient unimodale sous l'influence de la salinité (fig. 15).
- Dans le chenal de navigation, de fortes variations de salinité n'influencent pas la distribution de tailles des particules, tout comme dans le cas montré en figure 16.

Mais l'influence des paramètres physico-chimiques ne peut pas expliquer la diminution importante de la taille des particules en aval de l'île aux Coudres, alors que la salinité augmente,

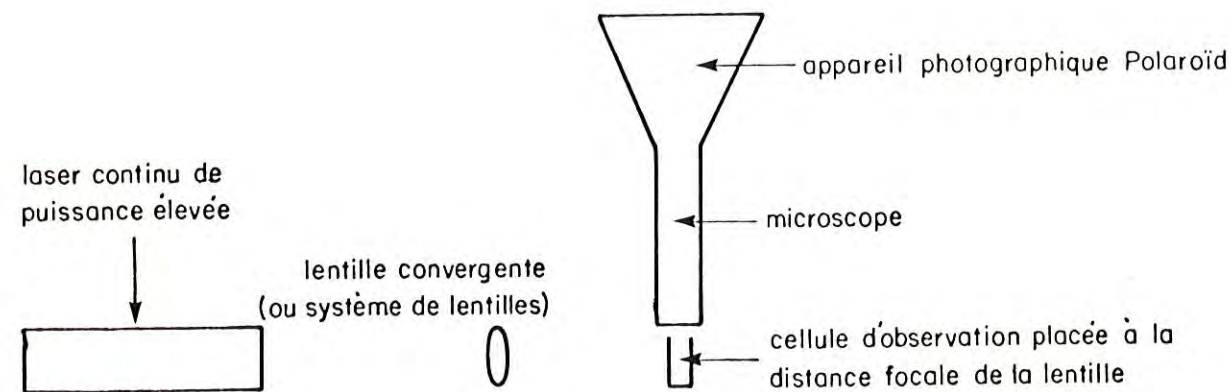
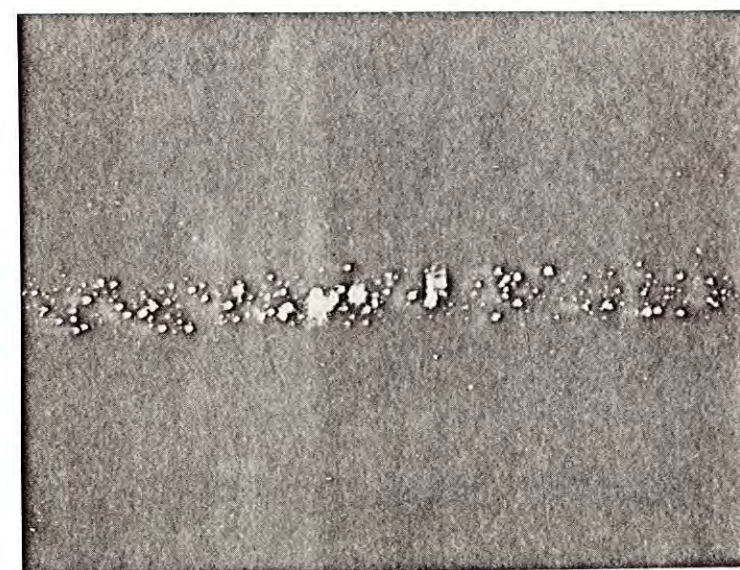
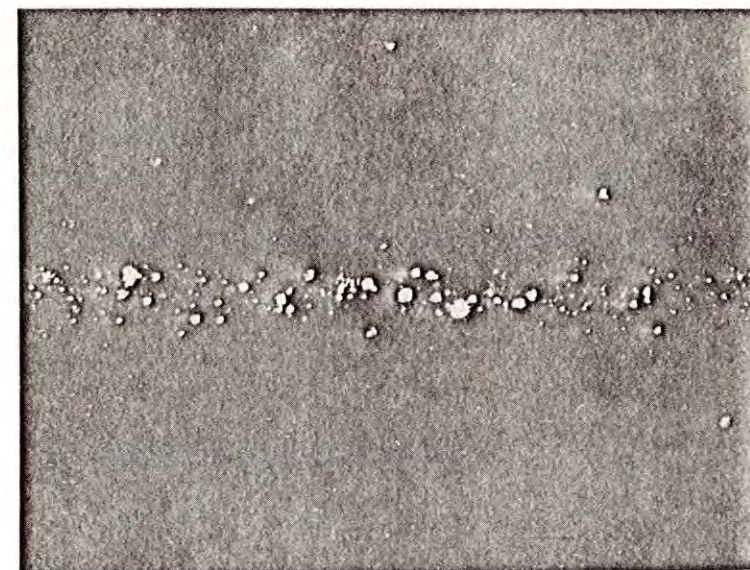


Fig. 17 — MONTAGE PRATIQUE RÉALISÉ POUR L'ULTRAMICROSCOPIE.



PHOTOGRAPHIES OBTENUES À L'ULTRAMICROSCOPE ET UTILISÉES POUR CALCULER LE TEMPS DE COAGULATION D'UNE SUSPENSION EN PROVENANCE DE LA RÉGION DE QUÉBEC.

puisque ce phénomène ne s'observe pas en laboratoire. Pour en tenir compte, il est nécessaire d'introduire le phénomène du transport des particules pour lequel la notion de circulation résiduelle s'avère particulièrement utile.

III. LES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DANS LA ZONE DE MÉLANGE ESTUARIEENNE

A) DISTRIBUTION DES MATIÈRES EN SUSPENSION

Comme nous l'avons expliqué précédemment, plusieurs phénomènes complexes régissent la distribution des matières en suspension dans les estuaires. Ce sont notamment :

1. La floculation

En présence d'eau salée, il se produit un phénomène de déstabilisation des particules colloïdales, amenant la formation de flocons. Ce comportement appelé coagulation, augmente la taille des particules naturelles et donc leur vitesse de chute.

2. La succession de déposition et de remise en suspension avec le renversement de courant

Ce phénomène est d'autant plus compliqué que la vitesse critique d'érosion est supérieure à la vitesse critique de déposition.

3. Le "bouchon de turbidité"

La présence d'une zone de forte turbidité a été observée dans la plupart des estuaires et ce phénomène a fait l'objet de nombreuses études. Les recherches actuelles tendent à démontrer que la circulation résiduelle est une des causes majeures de l'existence de ce bouchon de turbidité.

En résumé, les particules en suspension, atteignant la pointe amont de l'intrusion saline, coagulent, puis sédimentent. Elles peuvent alors être reprises par l'écoulement de fond à prédominance amont, être remontées à la surface lors des mélanges verticaux et être à nouveau recyclées par l'écoulement de surface à prédominance aval.

Ces mécanismes se combinent pour former un véritable "piège à sédiments" (Allen, 1973) et ont pour conséquence une accumulation locale des suspensions à proximité du point nodal des vitesses résiduelles.

Pour le Saint-Laurent, "le bouchon de turbidité" donne une distribution des matières en suspension qui suit approximativement le schéma de la figure 18. Cette figure représente la bande dans laquelle se regroupent les résultats des différentes campagnes pour la mesure des concentrations des solides en suspension (pour des périodes de mesures supérieures à 12 heures).

On constate une augmentation de 20 à 60 mg/l depuis la zone d'eau douce jusqu'au niveau de Cap Tourmente, où les maximums de concentration sont atteints. La concentration des suspensions décroît ensuite pour atteindre 10 mg/l au niveau de Cap aux Oies.

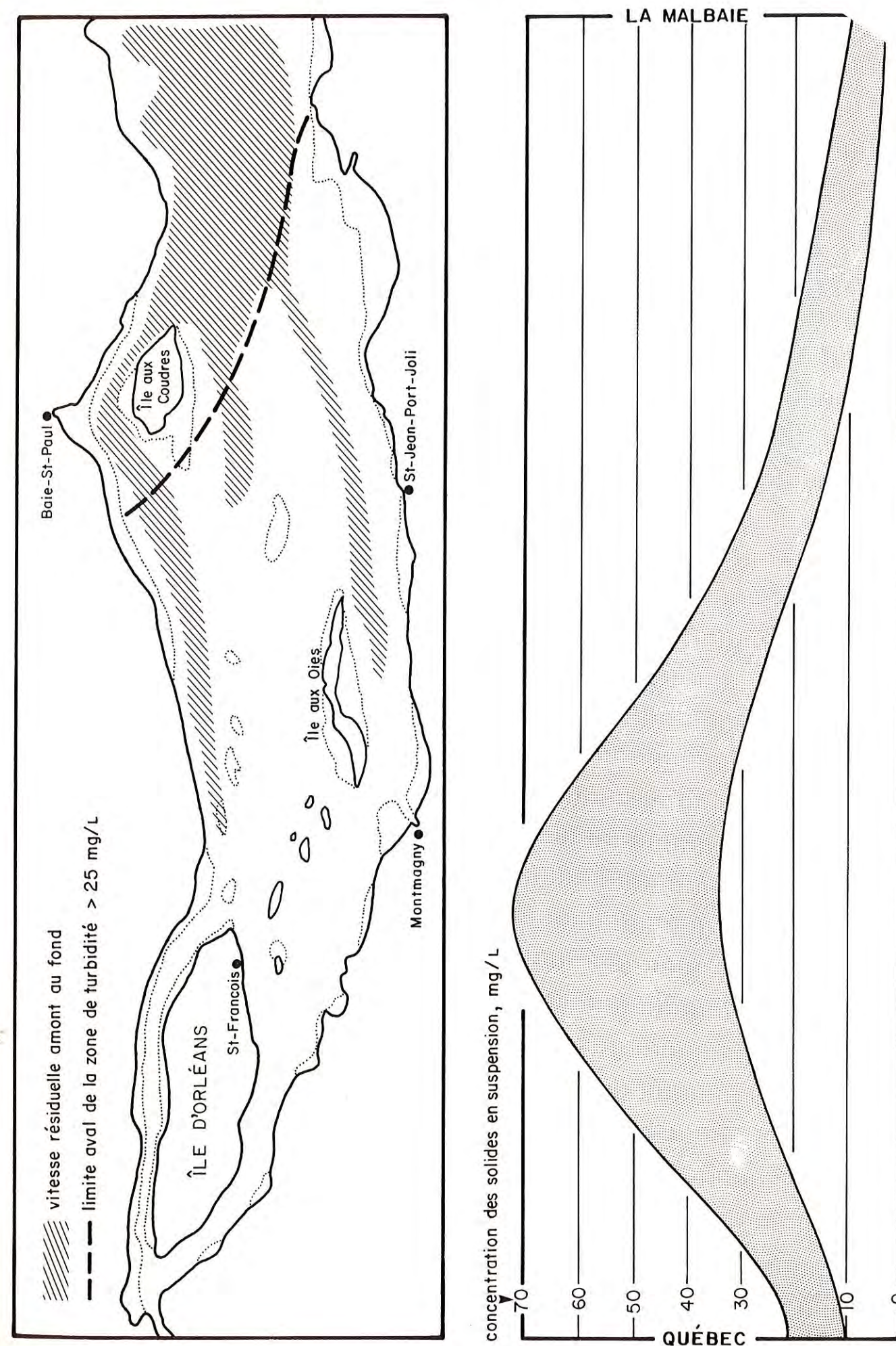


Fig. 18 - DISTRIBUTION DES MATIÈRES EN SUSPENSION DANS LA ZONE DE MÉLANGE ESTUARIEENNE.

La limite aval de cette zone de turbidité correspond bien avec la limite à partir de laquelle les vitesses résiduelles au fond sont dirigées vers l'amont sur toute la section.

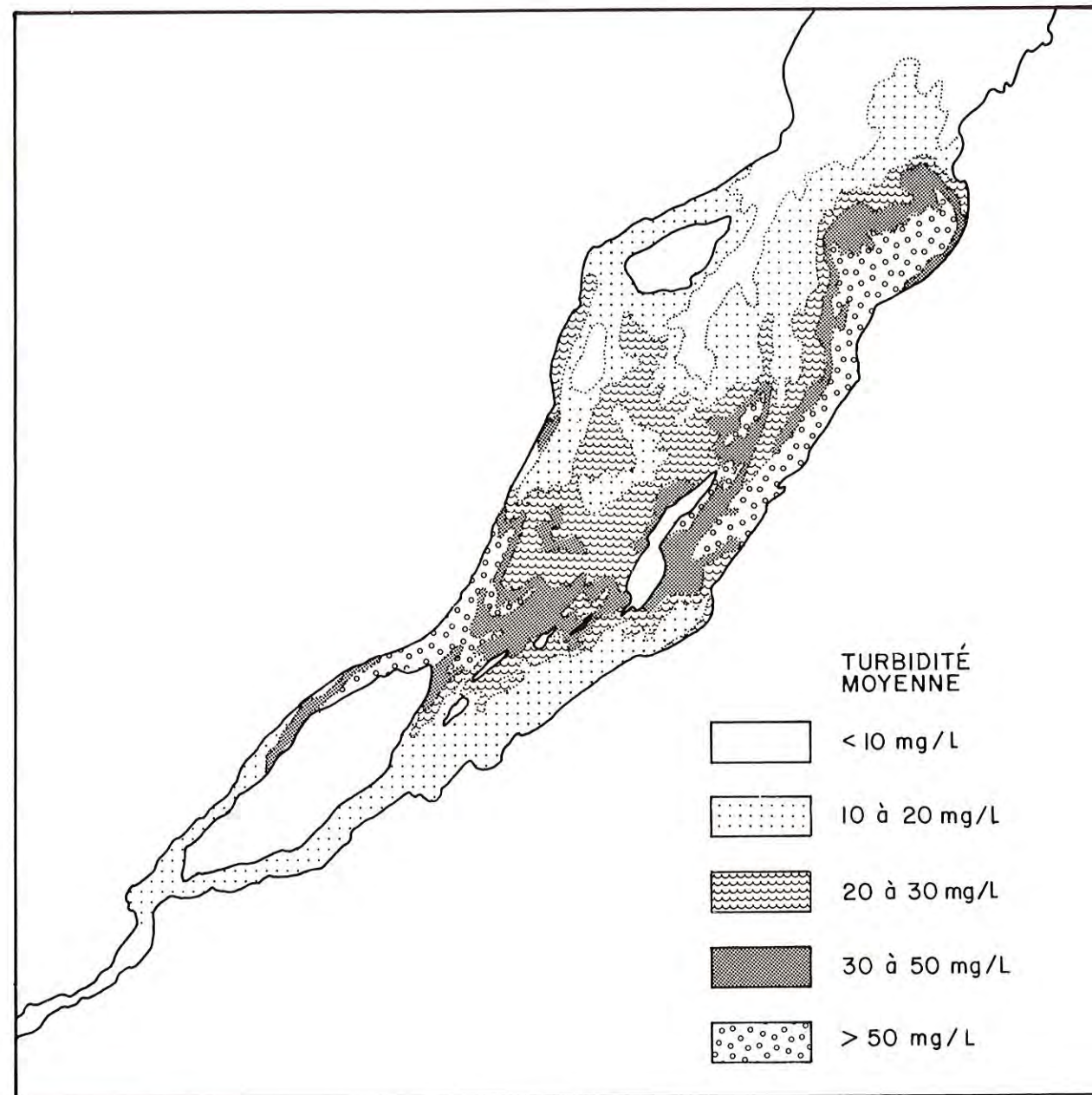
L'étude des variations de la concentration des solides en suspension en fonction du temps en divers points de l'estuaire tend à dégager deux phénomènes superposés:

- a) Tout d'abord, une turbidité relativement constante de 30 à 40 mg/l en relation avec le "piégeage" des matières en suspension. La turbidité est du même ordre au fond et en surface et se présente comme un trait permanent et caractéristique de la zone de mélange estuarienne.
- b) Un phénomène de remises en suspension et de dépositions successives, se manifestant surtout de l'aval de l'Île d'Orléans jusqu'à Cap Gribane. Dans cette zone, les pics de concentration sont nettement en phase avec les maxima de flot et de jusant et atteignent des valeurs élevées (200 à 400 mg/l). Ce fait est rendu possible par la disponibilité du fond en matériaux susceptibles d'être remis en suspension. Cette disponibilité est assurée, d'une part, par le dragage du chenal de navigation, d'autre part, par une accumulation locale de matériaux en amont du chenal nord où les vitesses résiduelles sont dirigées vers l'amont au fond.

De plus, l'étude par télédétection de l'estuaire (Rochon, 1975) a permis de mettre en évidence une excellente corrélation entre la teneur en solides en suspension et les coefficients d'atténuation optique et d'obtenir une image en couleurs (CENTREAU, 1975) qui permet de visualiser le rôle de l'hydrodynamique estuarienne sur la localisation du "bouchon de turbidité". Cette image est interprétée en figure 19. On distingue nettement les diverses masses d'eau correspondant aux zones les plus turbides (de 2 à 5) des régions (1) de faible turbidité et de salinité plus élevée.

Comme on peut le constater, il existe une très bonne correspondance entre les limites de ces masses d'eau de turbidités différentes et les limites des zones, où la vitesse résiduelle sur le fond est dirigée vers l'amont.

Cette correspondance entre la nature des écoulements et les informations optiques instantanées porte à croire que le "bouchon de turbidité" est contrôlé autant par la dynamique des masses d'eau que par les effets de coagulation et de déstabilisation des suspensions par les eaux salées.



Marée baissante le 29 août 1973 à 10 h 04 HNE
 Marée basse à l'Île aux Coudres : 10 h 47
 Marée basse à Québec : 14 h 40

Fig. 19 - DIFFÉRENCIATION DES MASSES D'EAU DU MOYEN ESTUAIRE
 DU ST-LAURENT

B) LOCALISATION DES ZONES DE DÉPÔT

Comme nous venons de le voir, le point nodal peut être le site d'une accumulation de sédiments. Cependant, le transport de fond (charriage et siltation), même s'il est faible, s'effectuera plutôt dans la direction de l'écoulement résiduel.

Ceci nous amène à identifier l'existence de quatre zones où les processus sédimentaires sont directement influencés par la circulation résiduelle:

1. Le chenal nord qui est le siège d'un recyclage important des particules en suspension, mais dans lequel le point nodal varie de façon sensible. Ce phénomène peut conduire à une accumulation de matériaux grossiers entre Cap Brûlé et l'Île d'Orléans, mais de peu de particules fines, du fait de la non-stabilité de la zone où la vitesse résiduelle au fond est dirigée vers l'amont.
2. Le chenal Beaujeu dans lequel on observe le même phénomène, mais qui, du fait de la plus grande stabilité de la zone à vitesse résiduelle amont au fond, peut conduire à une accumulation de sédiments fins (vase, limon) et, peut-être, à la formation d'une lentille de vase.

3. Les battures de la rive sud entre Montmagny et Rivière Ouelle, où les vitesses sont faibles, et où les eaux qui les recouvrent sont encore chargées de particules en suspension. Ces zones peuvent être le siège d'un dépôt de sédiments fins, notamment dans la baie de Sainte-Anne-de-la-Pocatière.
4. Les hauts fonds et les bancs découverts, où le cisaillement entre les chenaux qui les bordent, peut permettre le maintien de sables fins. À titre d'exemple, on peut nommer l'Île aux Ruaux, Banc Brûlé, Seal Islands, English Banks jusqu'en amont de l'Île aux Lièvres.

C) NATURE ET QUALITÉ DES SÉDIMENTS DE FOND

Dans une étude antérieure sur la qualité des sédiments (Soucy et Sérodes, 1975), nous avons appliqué au tronçon Québec-Trois-Pistoles une méthode similaire à celle mise de l'avant en 1974 sur le tronçon Varennes-Québec. Cette méthode consiste à choisir un certain nombre de paramètres particulièrement significatifs et à répartir en trois catégories les valeurs qu'ils présentent. Ces paramètres sont la matière humique, le césium 137, le zinc, les détergents anioniques et le phosphore total.

Lorsque, pour un échantillon de fond, la majorité des paramètres présentent des valeurs faibles, le point est considéré comme appartenant à une zone d'érosion ou de transport des sédiments. Pour des valeurs moyennes, on qualifie la zone de "moyennement polluée", mais propice à d'éventuels dépôts selon les conditions hydrodynamiques qui prévalent. Enfin, si la majorité des paramètres présentent des valeurs élevées, cette zone est appelée "zone préférentielle de dépôt et d'accumulation des polluants".

Grâce à cette méthode et à l'étude hydrodynamique précédente, nous avons pu identifier trois zones sédimentaires de la dernière catégorie.

1. Extrémité aval du bras nord de l'Île d'Orléans

Dans cette région les battures sont généralement très vaseuses et, sauf dans la partie centrale où le fond est constitué de matériaux sableux et graveleux, la qualité des sédiments est mauvaise. Les endroits les pires sont Château-Richer, les environs du quai de Sainte-Anne-de-Beaupré, la pointe d'Argentenaye et surtout la batture de la Pointe aux Prêtres à partir du quai de Beaupré. Il faut atteindre le banc de sable du Traverse Spit pour retrouver une qualité acceptable. La plus grande particularité des sédiments est leur forte teneur en phosphore, en mercure et en matière humique. Cette région qui se caractérise entre autre par la richesse de son avifaune et

par des eaux constamment turbides, est soumise à des écoulements assez complexes qui correspondent à la limite nord du point nodal.

2. Le chenal Beaujeu entre l'Île aux Oies et la rive sud

Cette région où alternent des eaux douces et des eaux saumâtres est très propice à la sédimentation des particules d'eau douce non déstabilisées et de particules coagulées au contact du front salin et amenées là par des courants propices. En effet, il semble bien que cette région puisse être alimentée en solides à la fois par l'amont, par l'aval et même par la rive nord sans compter bien sûr les apports de la rive sud elle-même avec principalement la rivière du Sud.

L'apport amont se conçoit facilement puisqu'une proportion appréciable du débit du Saint-Laurent emprunte le chenal Thomas entre la côte sud et les îles de l'archipel de Montmagny. Du côté aval, l'existence de vitesses résiduelles aval dans le chenal Beaujeu provoque une remontée d'eaux saumâtres dans le fond, entraînant un important transport solide où abondent les particules coagulées plus en aval. Enfin, si on considère l'existence des forces de Coriolis, les niveaux d'eau supérieurs sur la rive nord, par rapport à ceux de la rive sud, de même que l'inclinaison nord-ouest - sud-est des isohalines, tout porte à croire qu'une partie

assez importante des eaux ayant emprunté le chenal de navigation, traverse ensuite vers la rive sud entre l'Île aux Oies et le Seal Bank pour venir alimenter en solides la rive sud d'où les courants résiduels amont les emmènent dans le chenal Beaujeu.

Ces diverses considérations hydrodynamiques viennent corroborer la présence de sédiments d'assez mauvaise qualité tout autour de l'Île aux Oies et particulièrement à l'extrémité ouest de cette île ainsi que sur la rive sud du côté de l'Islet-sur-Mer et Trois-Saumons. La région se caractérise par des teneurs très élevées en phosphore, en carbone, en azote, en césium 137 et en matière humique, tandis que tous les métaux y sont présents en concentrations normales pour les sédiments du Saint-Laurent.

Il faut souligner que des carottages effectués près de l'Islet sur la rive sud laissent soupçonner des vitesses de sédimentation assez grandes (de l'ordre de 1 cm par année au moins) et il serait très utile d'explorer par carottage toute la région de l'Île aux Oies qui semble la zone de sédimentation la plus active du moyen estuaire.

3. La baie de Sainte-Anne-de-la-Pocatière

Au point de vue qualité chimique globale, cette région est semblable à la précédente avec des teneurs organiques et radioactives élevées. Ce qui est particulièrement remarquable dans cette région, c'est le type de dépôts extrêmement fluides et vaseux constamment remis en suspension par les marées baissantes et montantes.

Il est indéniable que le facteur hydrodynamique joue un rôle capital dans le comportement sédimentologique de la région. Les sédiments fins ne sont présents qu'entre la rive et l'axe Pointe-aux-Orignaux - Pointe Michaud; plus vers le large, on retrouve très rapidement du sable et des graviers sur une très grande surface recouverte par quelques pieds d'eau seulement. Les directions des courants sont toujours parallèles à l'axe déjà mentionné quel que soit l'état de marée, ce qui montre l'existence d'un important cisaillement entre la masse très dynamique du centre du fleuve et les eaux contenues dans l'échancrure de la baie de Sainte-Anne. L'existence de cette démarcation et le fait que la couche vaseuse ne dépasse pas 6 à 8 pouces (15 à 20 cm) et repose sur un fond de galets, nous incitent à croire que cette région est actuellement en équilibre, c'est-à-dire que même si elle est alimentée en solides par l'amont et par la rive nord, elle ne progresse

pratiquement plus, les solides étant entraînés soit vers l'aval, soit plutôt vers l'amont, par le chenal Beaujeu jusqu'à la pointe est de l'Île aux Oies.

En résumé, même si elle demeure préliminaire, cette analyse de la circulation résiduelle dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent, a permis d'orienter l'échantillonnage des sédiments de fond vers les zones où les suspensions et la sédimentation des matériaux fins ont tendance à se concentrer. De plus, la connaissance de l'hydrodynamique est essentielle à l'interprétation des résultats sur la répartition des polluants dans les zones préférentielles de dépôts.

IV. CONCLUSION GÉNÉRALE

Des études précédentes et de celles de Centreau effectuées sur les sédiments du Saint-Laurent, il est apparu que l'aspect hydrodynamique se doit d'être étudié en même temps que les aspects qualitatifs des sédiments. Si cette association se justifie en milieu purement fluvial, elle devient absolument indispensable en milieu estuarien où à la complexité de la topographie s'ajoute le caractère ondulatoire et non permanent des écoulements.

L'une des façons de caractériser ce comportement hydrodynamique est l'étude des vitesses résiduelles qui constitue le bilan, sur un cycle de marée, entre les écoulements dirigés vers l'amont et ceux dirigés vers l'aval. Cette étude requiert évidemment des mesures de vitesses en direction et en intensité pendant au moins 12 heures continues. En utilisant les résultats des études effectuées par divers chercheurs, on a pu démontrer l'existence de trois chenaux où des vitesses résiduelles amont se manifestent: le chenal de navigation le long de la rive nord, le Middle Traverse au sud de l'Île aux Coudres et le chenal Beaujeu le long de la rive sud jusqu'à l'Île aux Oies.

Ces écoulements résiduels vers l'amont sont évidemment associés à la remontée d'eau salée sur le fond, les eaux douces fluviales s'écoulant plutôt en surface. Cette circulation particulière conditionne

non seulement le comportement des suspensions, mais également tout le processus sédimentaire. En effet, elle va provoquer des remontées de solides et une importante remise en suspension le long de la zone nodale (vitesse résiduelle nulle). Les diverses régions à vitesses résiduelles dirigées vers l'amont vont donc présenter - et présentent d'ailleurs - les turbidités naturelles les plus élevées de l'estuaire.

De plus, les différences de niveaux d'eau entre la rive nord et la rive sud, la direction des courants et l'inclinaison des isohalines nous permettent de croire qu'il existe une migration importante des particules les plus fines de la rive nord vers la rive sud et ce entre l'Île aux Coudres et l'Île aux Oies.

D'autre part, les concentrations rencontrées dans le "bouchon de turbidité" sont augmentées artificiellement par les dragages effectués en aval de l'Île d'Orléans dans le but de maintenir la profondeur du chenal maritime. Cette source locale de suspensions provoque des variations importantes de la turbidité. Les particules ayant séjourné longtemps dans l'estuaire ont pu évoluer par rapport à des particules originaires de l'eau douce. Elles peuvent donc avoir des réactions différentes envers la salinité.

Quant aux caractéristiques granulométriques des suspensions, l'étude de la coagulation montre qu'elles sont surtout influencées par la salinité dans la zone de premier contact (salinité de 1 à 10%) située immédiatement en aval de l'Île d'Orléans. Cette zone correspond d'ailleurs à la zone de turbidité maximale.

Par contre, à l'aval de l'île aux Coudres, les particules en suspension ont un diamètre moyen très inférieur à ceux de la zone turbide, même si la salinité y est plus grande. Les essais en laboratoire ont d'ailleurs montré que la seule augmentation de salinité ne peut expliquer cet écart.

Pour comprendre ce comportement des suspensions, il est alors nécessaire de faire appel de nouveau à la circulation des diverses masses d'eau de l'estuaire et en particulier à la circulation résiduelle. En surface, l'écoulement, en moyenne au cours du temps, se fait principalement vers l'aval alors qu'au fond, les courants de marée provoquent localement une circulation résiduelle dirigée vers l'amont. Donc, les plus grosses particules qui séjournent préférentiellement dans les couches inférieures auront une plus grande probabilité d'être reprises par des courants dirigés vers l'amont, ce qui provoque leur recirculation et explique la formation du "bouchon de turbidité".

Quant aux particules fines, elles peuvent s'échapper vers l'estuaire moyen inférieur par l'écoulement de surface dirigé préférentiellement vers l'aval.

Les résultats de ces études à caractère physique et chimique viennent confirmer et quelquefois expliquer certaines constatations obtenues à partir des analyses de qualité des sédiments, c'est-à-dire la localisation préférentielle des zones de sédimentation et d'accumulation des polluants sur la moitié sud de l'estuaire plutôt que du côté nord.

Il faut alors remarquer que ces zones affectées par la pollution amont sont des zones écologiques particulièrement productrices: nidification des canards à l'extrémité aval du bras nord de l'île d'Orléans, aires de repos et de nourriture pour les oies sur les battures du Cap Tourmente, des îles et de la rive sud, etc...

Même si ces études permettent maintenant de mieux comprendre le comportement de l'estuaire moyen du Saint-Laurent, d'évaluer avec plus de précision le rôle du mouvement ondulatoire de ses eaux et l'influence des eaux salées remontées du golfe Saint-Laurent, plusieurs points restent encore à préciser. Nous pouvons citer entre autres:

- l'importance d'approfondir la relation entre la dynamique (vitesse résiduelles) et la salinité (coagulation et déstabilisation des suspensions) sur l'évolution et la sédimentation préférentielle des solides apportés par les eaux douces fluviales;
- le besoin d'étudier par des moyens globaux et rapides (télédétection) l'évolution spatiale et temporelle du "bouchon de turbidité";
- l'étude de l'évolution dans le temps de la qualité des sédiments et des zones préférentielles de sédimentation, où résident de nombreux polluants susceptibles de contaminer de riches sites écologiques;
- l'étude de l'influence des travaux de dragage du chenal de navigation non seulement sur les perturbations écologiques qu'ils entraînent, mais également sur la modification des écoulements qu'ils

provoquent. Nous pensons en particulier au rôle que le chenal de la rive nord joue sur les zones de dépôts de la rive sud et sur la baie de Sainte-Anne-de-la-Pocatière.

D'une façon générale, on peut dire que tous les travaux d'aménagement (ports, chenaux, quais, centrales...) dans l'estuaire ne devraient pas être entrepris sans études préalables approfondies, car les conséquences et l'impact de telles interventions sont parfois imprévisibles et peuvent s'étendre géographiquement très loin du lieu des travaux.

La fragilité reconnue des système biologiques estuariens couplée avec une dynamique complexe et des équilibres physico-chimiques des eaux et des sédiments très sensibles sont autant de facteurs qui devraient nous inciter à n'intervenir dans ce milieu qu'avec précaution.

RÉFÉRENCES

- ALLEN, G.P., 1973. *Étude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde*. Mémoires I.G.B.A.
- BOWDEN, K.F., 1967. *Circulation and Diffusion*. A.A.A.S., pp. 15-36.
- CENTREAU, 1975. *Étude de la qualité des sédiments et suspensions du fleuve Saint-Laurent entre Québec et Trois-Pistoles*. Rapport No CRE-75/14, Tome I, Centre de Recherches sur l'Eau. Univ. Laval. Québec. 153 p., 71 fig., 9 cartes.
- KRANCK, K., 1973. *Flocculation of Suspended Sediment in the Sea*. Nature. Vol. 246 (5432): 348-350.
- OUELLET, Yvon et Jacky CERCEAU, 1976. *Mélange des eaux douces et salées du Saint-Laurent - Circulation et salinité*. Les Cahiers de Centreau. Vol. I (4), juillet 1976. 57 p. et ann.
- ROCHON, Guy, 1975. *Étude des caractéristiques des solides en suspension dans l'eau par télédétection*. Rapport No CRE-75/04. Centre de Recherches sur l'Eau. Univ. Laval. Québec. Rapport préliminaire.
- SHELDON, R.W., T.P.T. EVELYN and T.R. PARSONS, 1967. *Occurrence and Formation of Small Particles in Sea Water*. Limn. Oceanog., Vol. 12, p. 367.
- SIMMONS, H.B., 1966. *Field Experience in Estuaries*. Estuary and Coastline Hydrodynamics, pp. 673-690.
- SOUCY, Alain et J.B. SÉRODES, 1975. *Étude de la qualité des sédiments et suspensions du fleuve Saint-Laurent entre Québec et Trois-Pistoles*. Rapport No CRE-75/14, Centre de Recherches sur l'Eau. Univ. Laval. Québec. 154 p.
- WHITEHOUSE, U.G. and L.M. JEFFREY, 1954. *Flocculation in Estuaries*. API Research Project No 51, Texas Agri. and Mecan. Res. Foundation. College Station. Texas.