

Influence du couvert de glace sur l'étendue du panache de La Grande Rivière (baie James)

DANIELLE MESSIER,¹ SERGE LEPAGE² et SYLVAIN DE MARGERIE^{2,3}

(Received 4 October 1988; accepted in revised form 8 February 1989)

ABSTRACT. As a result of the La Grande Rivière hydroelectric complex development, the winter inflow of freshwater from La Grande Rivière into the ice-covered James Bay has increased from $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ under natural conditions to more than $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ during peak power production. A field program to monitor the related changes on the freshwater plume into the coastal waters of James Bay for the 1986-87 winter season was undertaken. These data were combined with previous observations for lower discharge (1980 and 1984).

Although the plume area increased markedly for the discharge values ranging from 500 to $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, the data showed very little change in the extent of the coastal plume for discharge varying between 1500 and $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Contrary to earlier predictions, this is explained by the effect of the land-fast ice zone, beyond which intense mixing occurs, rapidly diffusing the freshwater. The study also showed the importance of fortnightly tidal variations, which are expected to have a larger effect on vertical mixing and plume dynamics than changes in runoff.

Key words: plume, ice cover, La Grande Rivière, James Bay

RÉSUMÉ. À la suite de l'aménagement du complexe hydroélectrique de La Grande Rivière, l'apport d'eau douce de La Grande Rivière à la baie James, alors que cette dernière est couverte de glace, est passé d'environ $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en conditions naturelles à plus de $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en production de pointe. Une campagne intensive de mesures a été réalisée durant l'hiver 1986-87 afin d'évaluer les changements de son panache d'eau douce dans les eaux côtières de la baie James. Les résultats de cette campagne sont comparés aux observations antérieures alors que la centrale débitait de façon moindre (1980 et 1984).

Bien que la superficie du panache ait sensiblement augmenté pour des débits variant de 500 à $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les résultats indiquent peu de changements dans l'étendue du panache côtier pour des débits variant de 1500 à $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Contrairement aux premières prédictions, en effet, les glaces fixées au rivage constituent une limite au-delà de laquelle existe une zone de mélange intense qui diffuse rapidement l'eau douce. L'étude met également en évidence l'importance des variations semi-mensuelles de la marée dont l'effet sur le mélange et le dynamisme du panache serait plus important que celui dû aux variations du débit.

Mots clés: panache, couvert de glace, La Grande Rivière, baie James

INTRODUCTION

Dès l'hiver 1980, les limites du panache de La Grande Rivière sous couvert de glace se sont considérablement éloignées de l'embouchure en réponse à l'augmentation du débit d'eau douce inhérent à l'aménagement du complexe hydroélectrique de La Grande Rivière (Freeman *et al.*, 1982). De nombreux auteurs ont décrit les caractéristiques de panaches d'eau douce en condition d'eau libre (cités dans Ingram et Larouche 1987a, b), cependant, c'est grâce aux travaux entrepris dans les baies James et d'Hudson qu'il a été démontré qu'un couvert de glace hivernal a pour effet d'augmenter considérablement la superficie d'un panache pour un même débit (Freeman *et al.*, 1982; Ingram, 1981, 1983; Ingram et Larouche, 1987a,b; Ingram *et al.*, 1987). De plus, pour une même classe de débits, la superficie et la géométrie d'un panache sous glace peuvent varier énormément (Ingram et Larouche, 1987b). Parmi les facteurs les plus importants pouvant causer de telles variations, ces auteurs ont noté la stabilité de la colonne d'eau, la circulation côtière associée aux systèmes météorologiques à grande échelle, la période à laquelle débute la prise des glaces et la qualité de l'englacement qui en résulte.

Grâce à une campagne intensive sous la glace fixée au rivage en 1987 et à un réexamen des données de 1980 et 1984, nous avons pu faire ressortir l'influence du couvert de glace sur l'étendue du panache de La Grande Rivière. L'influence des variations journalières et semi-mensuelles de la marée sur les conditions de mélange dans la couche de surface a été également étudiée dans cette région côtière de la baie James caractérisée par une plate-forme très accidentée et peu profonde. La ressemblance des conditions observées en 1980,

pour des débits compris entre 1350 et $1750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et en 1987, alors que la centrale de La Grande 2 débitait entre 3500 et $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nous permettrait de conclure qu'au-delà d'un certain seuil critique estimé à $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, le débit n'est pas le seul facteur déterminant l'étendue du panache, mais que la discontinuité entre les eaux libres et la couverture de glace fixe poserait une limite à l'expansion latérale du panache de La Grande Rivière.

AIRE D'ÉTUDE

Avant l'aménagement de La Grande Rivière, son débit annuel moyen contribuait environ au tiers des apports d'eau douce de la côte est de la baie James. Avec l'aménagement du complexe La Grande, qui a nécessité le détournement de quatre rivières des bassins adjacents, le débit annuel moyen a été porté depuis 1984 de 1700 à $3400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Depuis 1980, le régime de la rivière est modulé par la production hydroélectrique de la centrale de La Grande 2 située à 117 km de son embouchure. L'apport en eau douce de La Grande Rivière représente désormais la moitié de l'ensemble des tributaires de la côte est, et cette augmentation se fait surtout sentir en hiver. Les débits hivernaux sont ainsi passés d'une valeur d'environ $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à plus de $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant l'hiver 1986-87 (Fig. 1).

La côte nord-est de la baie James est caractérisée par un grand découpage en de nombreuses baies peu profondes, et par une bathymétrie accidentée due à la présence de récifs et de crêtes. De décembre à mai, la baie est généralement couverte de glace. Sur la plate-forme côtière, la glace est fixée au rivage sur une distance d'environ 15 à 25 km ; l'épaisseur

¹Société d'énergie de la Baie James, 800 boul. de Maisonneuve est, Montréal Québec, Canada H2L 4M8

²CSSA Consultants Ltée, 1500 rue Stanley, Montréal, Québec, Canada H3A 1R3

³Adresse actuelle: ASA Consultants Ltd, P.O. Box 2025, Dartmouth East, Nova Scotia, Canada B2W 3X8

©The Arctic Institute of North America

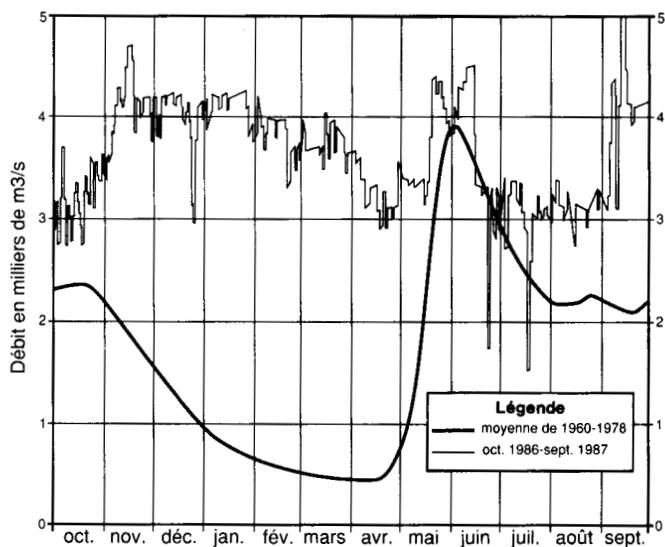


FIG. 1. Comparaison du débit journalier moyen de La Grande Rivière de 1960 à 1978 et du débit journalier moyen en 1986-87.

moyenne de cette glace fixée durant la période d'échantillonnage de l'hiver 1987 était de $0,82 \pm 0,12$ m. Au large, les conditions d'englacement varient selon les conditions météorologiques, entre une couverture complète et une couverture comprenant de larges zones d'eau libre où circulent les glaçons de dérive.

MÉTHODES

Du 20 février au 2 mars 1987, 85 profils de conductivité et de température en fonction de la profondeur ont été réalisés à l'aide d'une sonde Applied Microsystems, modèle CTD-12; la précision retenue pour les conditions d'échantillonnage rencontrées est de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, $\pm 0,1\text{‰}$ et $\pm 0,5$ m. Toutes les stations étaient situées sous la glace fixe, entre la baie Dead Duck au sud et la rivière Roggan au nord (Fig. 2). Les stations situées au nord de l'île Wastikun ont été visitées entre le 20 et le 24 février, tandis que celles de la région de l'embouchure de La Grande Rivière et au sud de celle-ci l'ont été entre le 28 février et le 2 mars. La morte-eau ayant lieu les 25-26 février et la vive-eau les 4-5 mars, les parties nord et sud ont donc été échantillonnées durant des conditions de marée moyenne.

Durant la campagne d'échantillonnage, cinq courantomètres Aanderaa RCM-4 ont été déployés pour enregistrer toutes les vingt minutes la température, la conductivité, la vitesse et la direction du courant. À chacune des stations 4 et 88, deux courantomètres ont été mouillés, l'un dans la couche de surface et l'autre à un mètre du fond pour une période comprise entre le 23 février et le 11 avril. Un seul appareil fut installé dans la couche de surface à la station 42 et pour la même période. Toutes les données courantométriques ont été réduites à une fréquence horaire à l'aide d'un filtre de type $A_6A_6A_7/6*6*7$ (Godin, 1972). Le positionnement de ces stations, comme celui des stations CTD, a été effectué à l'aide d'un système de positionnement micro-ondes Mini-Ranger III.

Durant la période d'échantillonnage, le débit de La Grande Rivière à La Grande 2 a varié entre 3286 et 3965 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ceci

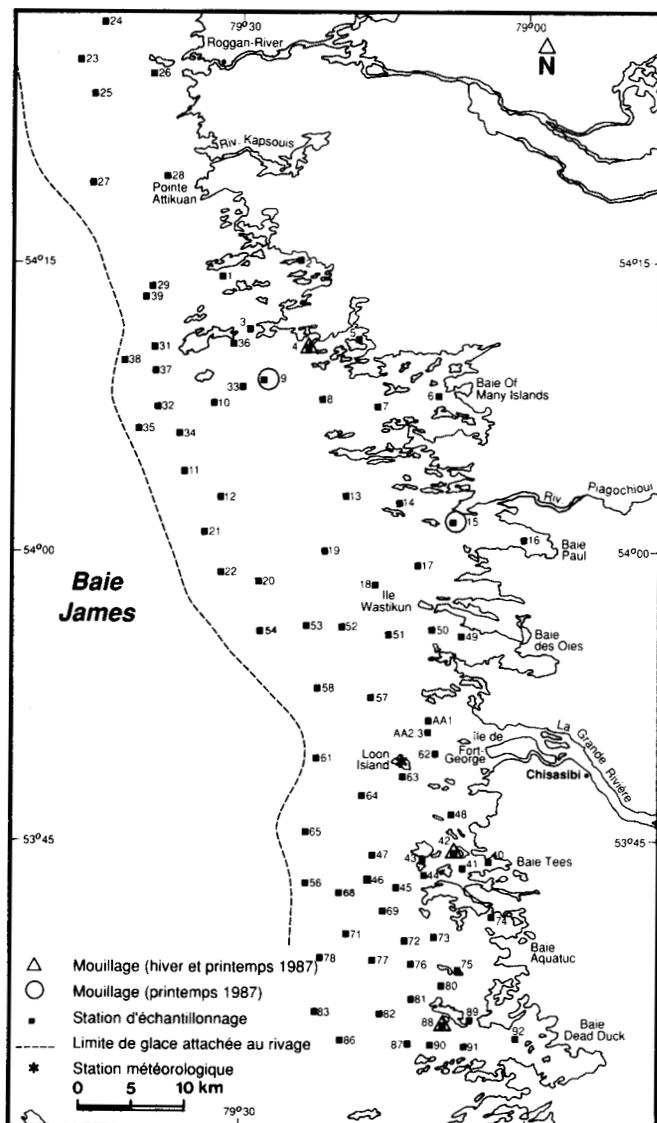


FIG. 2. Localisation des stations d'échantillonnage durant l'hiver 1987.

représente le débit total car les apports du bassin versant situé en aval de la centrale sont négligeables. Durant les trois premières semaines de février, il était autour de $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Fig. 1). En raison du temps de résidence du panache, estimé à 11-13 jours (Freeman *et al.*, 1982), un débit de l'ordre de $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est représentatif des conditions mesurées durant la campagne d'hiver 1987.

LE PANACHE DE LA GRANDE RIVIÈRE DURANT L'HIVER 1987

La distribution des isohalines de surface (salinité moyenne entre 1,0 et 1,75 m) apparaît à la figure 3. La région centrale du panache, délimitée par l'isohaline de 5 ‰, se situe entre le sud de la baie Aquatic (25 km au sud de l'embouchure) et le sud de la baie Of Many Islands (35 km au nord). Au nord, la salinité s'accroît pour atteindre environ 20 ‰ près de la pointe Attikuan (55 km au nord). La campagne de 1987 a permis de mettre en évidence le panache de la rivière Roggan, au nord de la pointe Attikuan. Par contre, la stratégie

d'échantillonnage n'a pas permis d'atteindre la limite ouest du panache. Au sud de La Grande Rivière, des salinités inférieures à 10‰ sont rencontrées le long de la côte à plus de 25 km de distance. Plus au large, un fort gradient de salinité sépare les eaux côtières d'une région à salinité supérieure à 20‰ (Fig. 3).

La structure transversale du panache de La Grande Rivière à la hauteur de l'embouchure (Fig. 4a) et à la baie des Oies (Fig. 4b) montre un système simple à deux couches tel qu'observé par Ingram et Larouche (1987a). Plus au nord, on observe un changement brusque dans le caractère du panache qui devient relativement plus diffus (Fig. 4c). Ce changement est associé à un fort gradient de salinité parallèle à la côte entre les isohalines de 5 et 10‰, tandis qu'ailleurs, le gradient principal est perpendiculaire à la côte (Fig. 3). Cet aspect du panache, que l'on retrouve d'année en année, laisse croire à un changement dans la dynamique de l'épanchement (Ingram et Larouche, 1987a). La bathymétrie, comprenant plusieurs crêtes d'orientation est-ouest, pourrait favoriser l'introduction et le mélange d'eaux à plus forte

salinité en provenance du secteur ouest. En bordure de la glace fixe, les profils de salinité sont en forme d'escalier (non illustrés), laissant supposer un forçage intermittent du vent sur les eaux libres.

COMPARAISON DU PANACHE DE LA GRANDE RIVIÈRE EN 1980, 1984 ET 1987

En 1987, on note peu de changements dans la superficie du coeur du panache (délimitée par l'isohaline de 5‰) comparée aux observations des campagnes précédentes et ce, malgré l'augmentation substantielle du débit d'eau douce (tableau 1). Les superficies calculées pour les années 1980

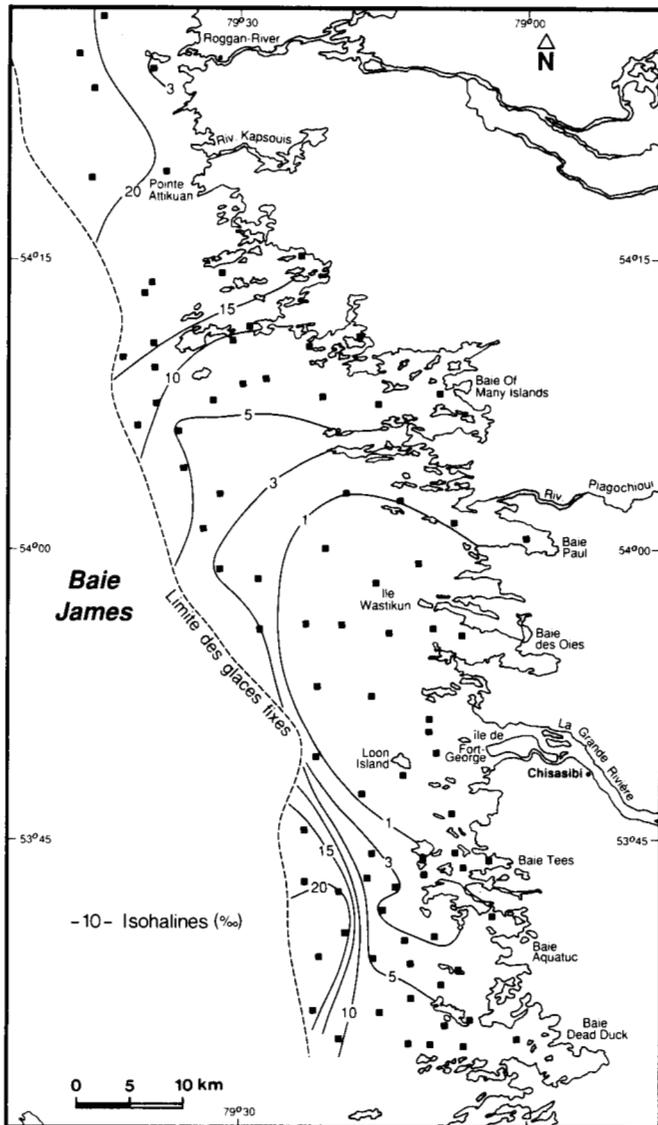


FIG. 3. Isohalines de surface durant l'hiver 1987.

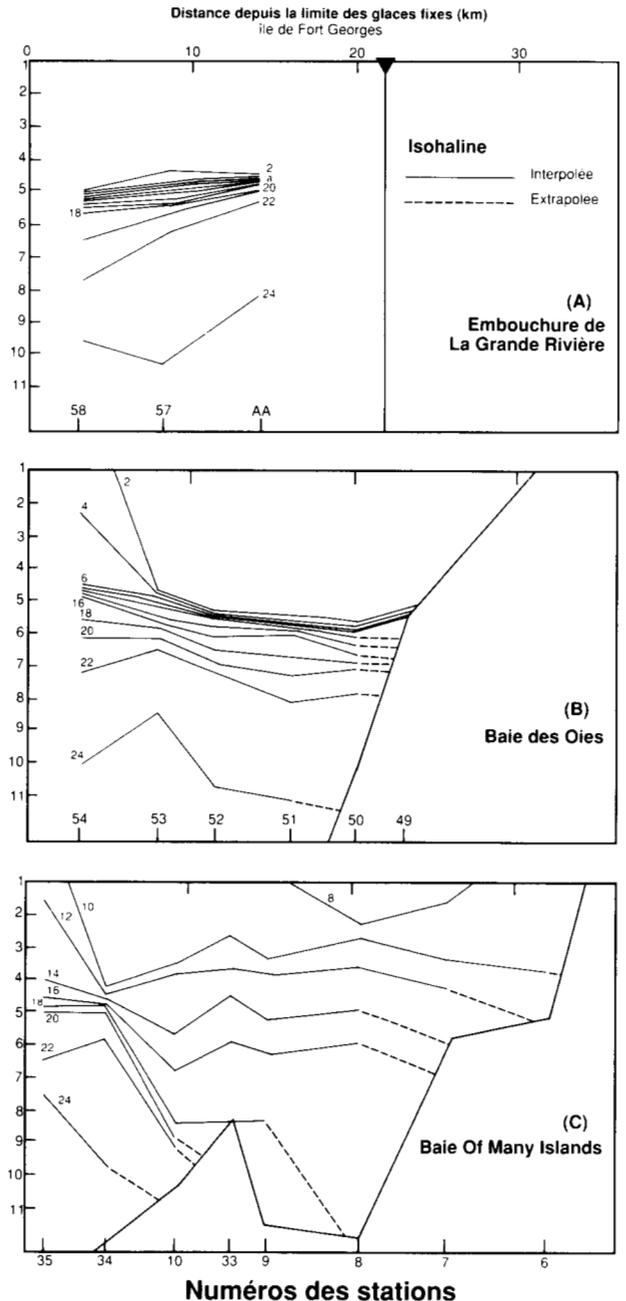


FIG. 4. Structure transversale du panache de La Grande Rivière (a) à la hauteur de l'embouchure, (b) à la baie des Oies et (c) à la baie Of Many Islands durant l'hiver 1987.

TABLEAU 1. Superficie limitée par l'isohaline de 5‰ et de 10‰ en fonction de différents débits

Isohaline	Débits		
	1750 m ³ ·s ⁻¹	3000 m ³ ·s ⁻¹	4000 m ³ ·s ⁻¹
5‰	1100 ± 220 km ²	1100 ± 220 km ²	1200 ± 120 km ²
10‰	> 1500 km ²	> 1800 km ²	> 1600 km ²

et 1984 sont basées sur la présentation de Roche (1984), tandis que les valeurs pour 1987 sont estimées en présumant que la limite des contours au large corresponde à la limite des glaces fixes. En ce qui concerne la précision des valeurs calculées, nous considérons 20‰ pour les années 1980 et 1984 et 10‰ pour 1987, étant donné la plus grande densité des stations (CSSA, 1987).

L'étendue longitudinale du panache de La Grande Rivière, présentée antérieurement pour les hivers 1980 et 1984 (Roche, 1984; Ingram et Larouche, 1987a), a été actualisée avec les données de 1987 et uniformisée quant à la salinité de surface (moyenne entre 1,0 et 1,75 m) et à l'échelle horizontale (Fig. 5). Notons qu'une erreur à l'échelle horizontale de la figure 5 de Ingram et Larouche (1987a) (Ingram, comm. pers.) ne permet pas de comparer les deux illustrations. Les stations retenues ont été sélectionnées de façon à permettre une correspondance géographique des sites pour les trois années

d'étude. La correspondance des stations de 1984 est compliquée par le fait que seules 4 des 12 stations échantillonnées sous glace fixe ont pu être retenues. Malgré l'augmentation importante des débits entre 1980 et 1987, l'étendue linéaire du panache a peu changé, au nord comme au sud de l'embouchure. Les faibles différences notées pourraient être imputables à la position relative des stations d'une année à l'autre, ainsi qu'à des variations temporelles à court terme.

En 1980, la limite de l'isohaline de 20‰ était située au nord de la baie Of Many Islands tandis qu'en 1987, elle se situait près de la pointe Attikuan, environ 10 km au nord. La présence d'eau de plus faible salinité (19‰) au large de la rivière Kapsaouis (station 28) pourrait venir de l'influence de ce cours d'eau.

La salinité mesurée aux stations côtières indique la présence d'eau saumâtre bordée d'une zone frontale à plus de 30 km au sud de l'embouchure de La Grande Rivière. Sur la figure 5 en portion gauche, on peut noter, selon la position des stations, la présence de deux modes (tous deux représentés par les données de 1987), l'un côtier et l'autre hauturier. L'étendue du panache vers le sud est restreinte à la côte, et son prolongement longitudinal est plus important que ne le montraient les études précédentes (Freeman *et al.*, 1982; Ingram et Larouche, 1987a) bien que les données antérieures corroborent les résultats de 1987 (Fig. 5). Puisque 75% de l'écoulement de La Grande Rivière emprunte le chenal nord

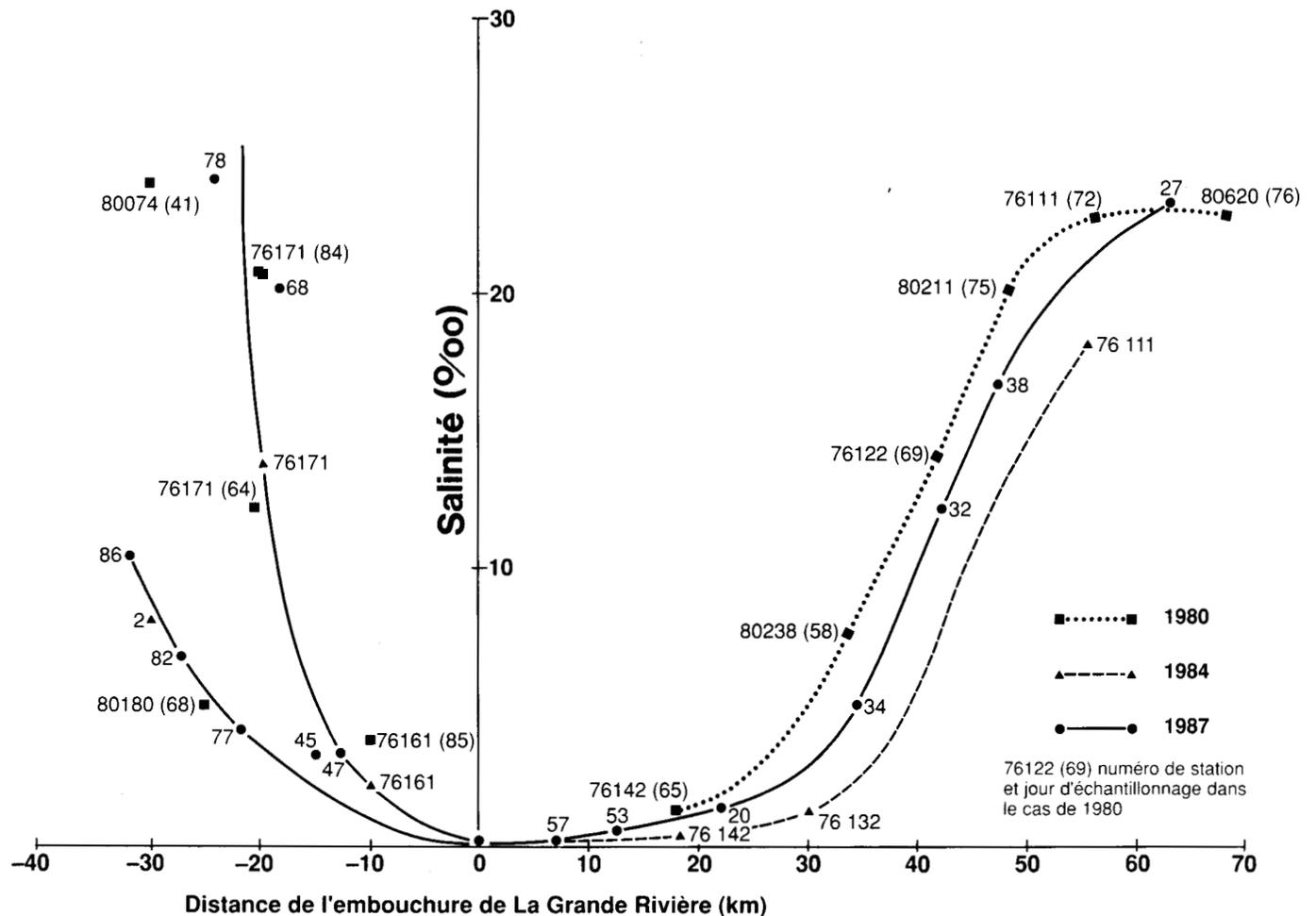


FIG. 5. Étendue linéaire sud-nord du panache de La Grande Rivière en hiver 1980, 1984 et 1987 (adaptée de Ingram et Larouche, 1987a).

de l'île de Fort-George (données SEBJ) et que l'écoulement résiduel est dirigé vers le nord dans ce secteur de la baie James, cette rivière n'est peut-être pas la source unique de cette eau à faible salinité. L'acquisition de données additionnelles permettrait d'étudier l'extension réelle du panache de La Grande Rivière vers le sud.

VARIABILITÉ JOURNALIÈRE

Bien que la couverture de glace atténue l'amplitude de la marée d'environ 30% (données SEBJ) à l'archipel Loon, la variation journalière influence notablement la structure du panache. Des données de profils relevés sur une période de 25 heures en 1980 ont été utilisées pour illustrer cette variabilité à la station 80132, située dans le coeur du panache, et 76122, située dans la zone frontale (Freeman et Flemming, 1982) (Fig. 6). Peu après la marée haute, la pycnocline s'élève vers la surface, accentuant le mélange dans la couche de surface et entraînant ainsi une augmentation de la salinité. Durant la marée basse, on observe la situation inverse. À ces deux sites, les courants les plus intenses ($40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) sont observés entre 5 et 10 m de profondeur durant le flot et dirigés vers la côte.

Cette variabilité souligne le dynamisme du panache et la difficulté d'interprétation des résultats quant à la salinité dans la couche de surface lors des campagnes CTD. Par exemple, à la station 80132, un relevé effectué à 2 m de profondeur à marée basse résulterait en une salinité inférieure à 10‰; peu après la marée haute, ce relevé indiquerait 20‰. Les relevés courantométriques de 1987 confirment cette variabilité, montrant des changements allant jusqu'à 14‰ sur une période de 12 heures à la station 42 (Fig. 7).

VARIABILITÉ SEMI-MENSUELLE

Les données courantométriques enregistrées aux stations 4, 42 et 88 en 1987 indiquent que le cycle de marée morte-eau/vive-eau module la vitesse des courants par un facteur d'au moins deux (Fig. 7). À toutes ces stations côtières, on remarque à la vive-eau une augmentation de la salinité de surface sur une période de neuf jours. Après la morte-eau, la salinité diminue pendant cinq jours. Cette périodicité a également été notée par Ingram (1983) dans le détroit de Manitousuk (baie d'Hudson). Durant la vive-eau de la fin du mois de mars, on note une augmentation plus marquée de la salinité de surface aux trois stations; cette hausse résulte en une augmentation de 7 à 10‰. Bien qu'elle coïncide avec une diminution du débit de La Grande Rivière de $300 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, cette augmentation pourrait être liée à un ajustement saisonnier encore mal connu. Signalons l'absence d'un signal à périodicité de quatre à cinq jours de nos séries temporelles, signature habituelle du forçage atmosphérique.

VARIABILITÉ INTERANNUELLE

Les résultats présentés montrent qu'aucune variabilité interannuelle significative de l'étendue du panache n'existe entre les années 1980, 1984 et 1987. Pourtant les études précédentes liaient la superficie du panache au débit qui a plus que doublé pour la même période de temps (Freeman, 1982; Roche, 1984; Ingram et Larouche, 1987a). Ces modèles reposaient sur l'hypothèse que le panache était en état sta-

tionnaire et ne devaient pas tenir compte de l'effet des eaux ouvertes sur l'étendue du panache.

Les données recueillies en 1987 mettent en évidence l'importance des variations journalières et semi-mensuelles des marées. Sous la glace, les courants de marée sont la principale source d'énergie du mélange (Freeman *et al.*, 1982). Sur une période de 14 jours, ces courants sont modulés par un facteur deux, et puis le taux d'énergie disponible pour

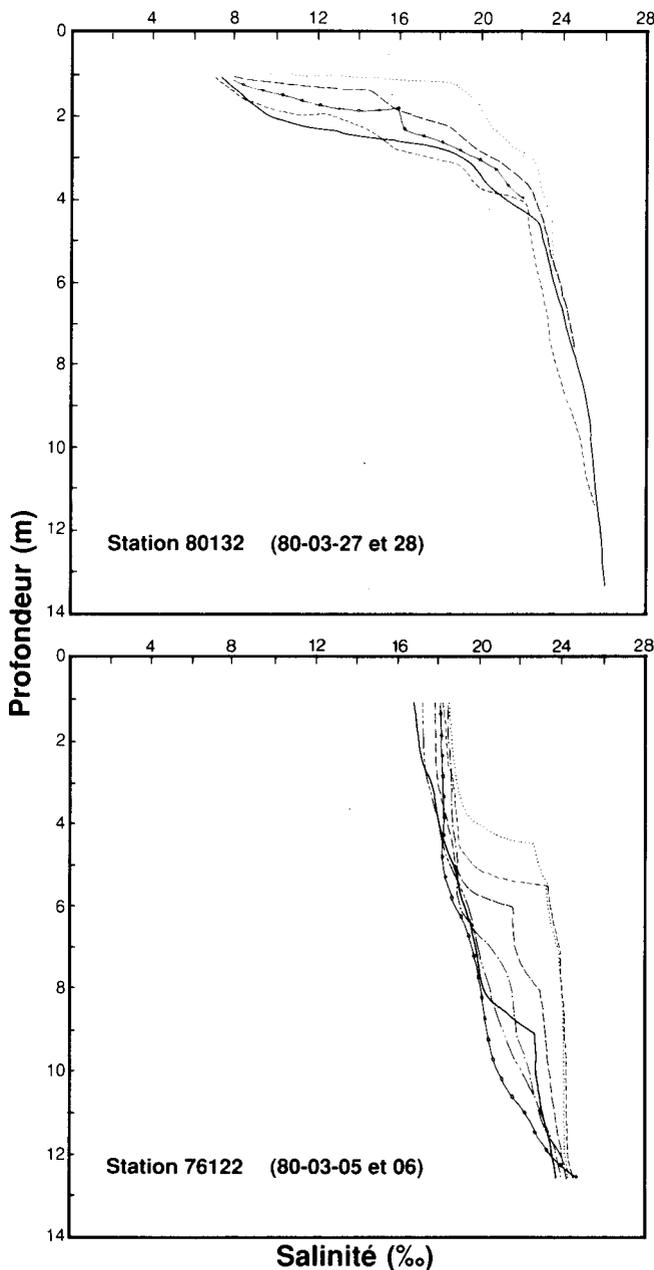


FIG. 6. Variation de la salinité (a) à la station 80132 (80-03-27 et 28) et (b) à la station 76122 (80-03-05 et 06).

le mélange est proportionnel au cube de la vitesse, le mélange est modulé par un facteur huit. Le temps de résidence, estimé de 11 à 13 jours (Freeman *et al.*, 1982), serait le temps requis pour l'ajustement du panache à tout changement dans le forçage. Comme celui-ci est comparable à la période semi-mensuelle, le panache ne peut jamais atteindre un état stationnaire et est en quête continue d'un équilibre avec le taux de mélange changeant.

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la zone d'eau libre constitue une limite efficace à l'extension du panache vers le large (Ingram *et al.*, 1987). La discontinuité de stress de surface entre les eaux libres et celles couvertes de glace engendre une région de cisaillement horizontal très important qui force un mélange horizontal. De plus, la houle et le vent forcent un mélange vertical accru dans la zone d'eau libre. Dans la zone des eaux libres, la structure en deux couches du panache disparaît et le mélange résultant a pour effet de diluer les eaux de la couche de surface (0-10 mètres) sur une distance transversale difficile à évaluer. Pour l'ensemble des données de 1980 (Freeman et Fleming, 1982) et de 1984 (inédites), un total de 42 profils réalisés sur des glaçons (épaisseur inférieure à 40 cm) affichaient une salinité en surface inférieure à 24‰; de ce nombre seulement deux conservaient une structure en deux couches (station 80132 jour 68 en 1980 et 76154 en 1984).

En conditions naturelles, le panache de La Grande Rivière était entièrement situé sous la glace côtière pour des débits de l'ordre de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'isohaline de 24‰ correspondait à l'emplacement approximatif de la zone ouverte. Dès 1980, la première année de mise en service de la centrale de La Grande 2, l'isohaline de 20‰ était repoussée au bord frontal de la glace, pour des débits de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Freeman *et al.*,

1982). L'augmentation du débit a également provoqué l'expansion du panache le long de la côte. En 1984 (Ingram et Larouche, 1987a) et en 1987, le panache atteignait nettement la limite de la glace fixe, tandis que l'étendue du panache le long de la côte restait sensiblement la même qu'en 1980. La stabilisation transversale du panache côtier pour des débits supérieurs à $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s'explique par l'effet limite des glaces fixes, au-delà desquelles un mélange intense se produit.

L'étendue de la glace côtière peut donc constituer l'un des éléments clés de la superficie et de la géométrie d'un panache sous glace. Dans la baie James, la limite de la glace fixée au rivage ne varie pas en fonction du débit de La Grande Rivière. Elle dépend plutôt de la bathymétrie locale et des conditions de marée (Freeman *et al.*, 1982; Ingram et Larouche, 1987a). Cette limite correspond approximativement à l'isobathe de 20 m et à l'extension des crêtes et récifs de la plate-forme côtière. Bien qu'affichant une certaine variabilité (Fig. 8), la localisation de la brisure de la glace côtière pose, d'année en année, une limite à l'expansion du panache. L'étendue des glaces fixes pourrait être, en partie, la cause

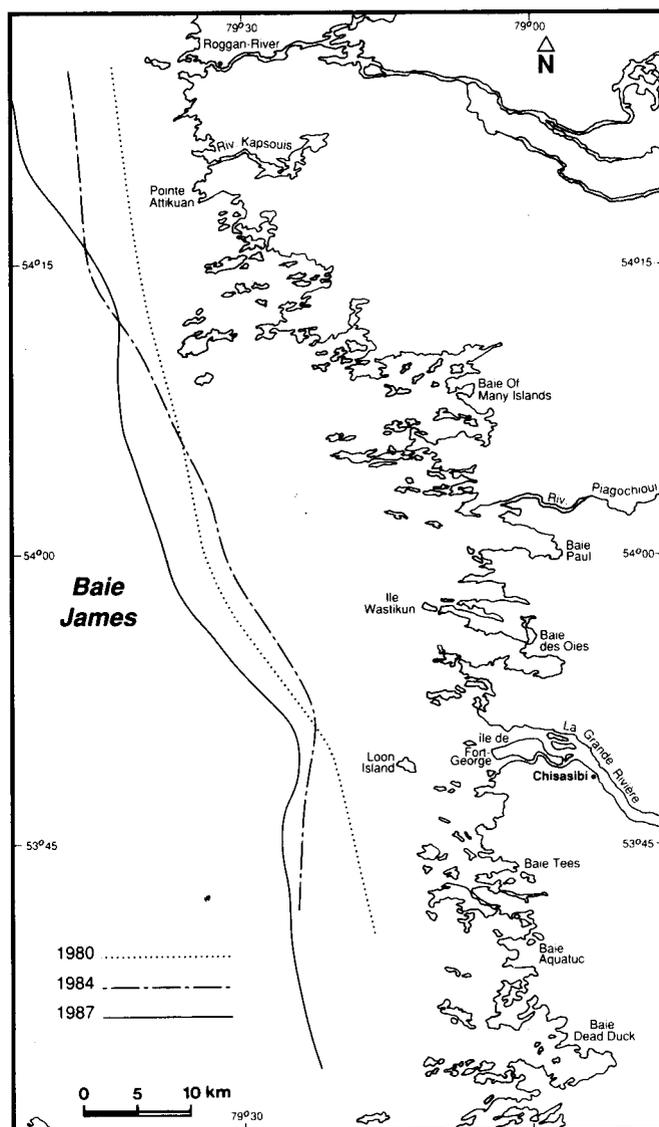


FIG. 8. Cartographie de la glace côtière en 1980, 1984 et 1987.

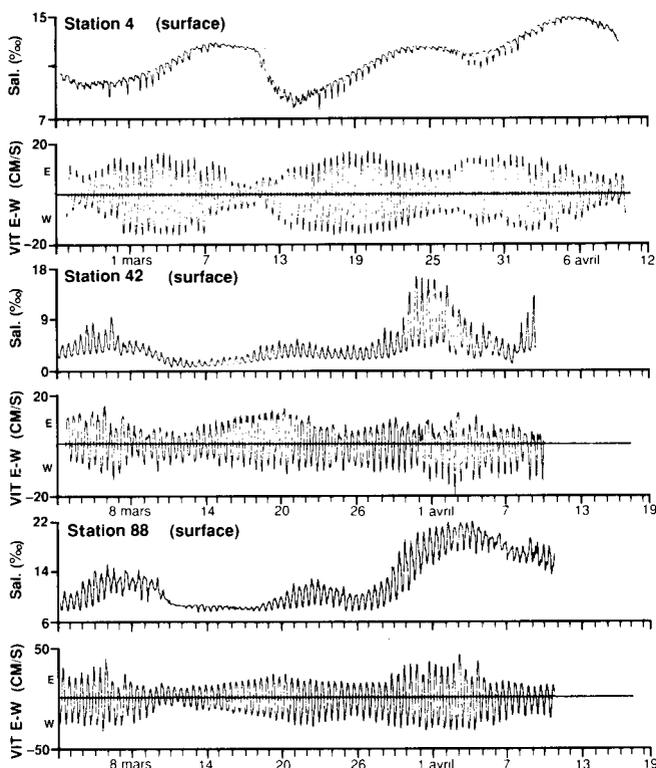


FIG. 7. Séries temporelles de la salinité et du courant est-ouest dans la couche de surface aux stations (a) 4, (b) 42 et (c) 88 durant l'hiver 1987.

des variations interannuelles notées dans la superficie du panache de La Grande Rivière de 1980 à 1987.

Si la limite des glaces fixes est stable, le degré d'englacement au large varie en fonction des conditions météorologiques. La répartition du couvert de glaces mobiles est liée à la variabilité temporelle des événements météorologiques d'une périodicité de quatre à cinq jours (Ingram et Larouche, 1987a). Bien qu'aucune donnée ne permette une vérification directe de la variabilité du panache aux abords de la glace fixe, les profils en forme d'escalier recueillis dans cette région sont l'indice d'un forçage intermittent.

CONCLUSION

Avant l'aménagement du complexe La Grande, le panache de La Grande Rivière était situé entièrement sous un couvert de glace stable. Dès le premier hiver de production à la centrale de La Grande 2, les débits étaient suffisamment élevés pour repousser le panache à la limite des glaces fixes. Durant l'hiver 1987, malgré une augmentation du débit par un facteur deux, le panache de La Grande Rivière occupait sensiblement la même superficie qu'en 1980. La discontinuité entre les eaux libres et celles couvertes de glaces limite, au large, la structure en deux couches du panache. Pour des débits supérieurs à $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, on peut s'attendre à ce que les changements dans l'étendue du panache soient tout au plus du même ordre de grandeur que ceux dus à la variabilité associée aux marées.

Les modèles qui avaient servi à prédire l'effet d'une augmentation de débit sur le panache de La Grande Rivière (Freeman, 1982; Roche, 1984) sous couvert de glace supposaient que les processus qui réglaient l'étendue du panache en conditions naturelles seraient les mêmes qu'en condition de débit augmenté. Cette hypothèse n'est pas valable lorsque le panache rejoint la limite des glaces fixes, et les modèles surestiment l'étendue du panache pour des débits supérieurs à $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De meilleures prédictions pourraient sans doute être obtenues en tenant compte du mélange accru au large des glaces fixes (Ingram et Larouche, 1987a), de la contribution des glaces au bilan d'eau douce en période de fonte (Prinsenber, 1988) et de la variation temporelle du dynamisme du panache. Une nouvelle campagne de mesures durant l'hiver 1989 nous permettra peut-être de résoudre la variation du panache, due aux marées mais il y a peu d'espoir

de cerner les mécanismes de mélange au large des glaces fixes, compte tenu des contraintes d'échantillonnage.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été entièrement financée par la Société d'énergie de la Baie James dans le cadre de ses études environnementales du projet de suréquipement de la centrale de La Grande 2. Les auteurs remercient Mitchell Sisak et Sam Salley, de CSSA Consultants Ltée, pour leur dévouement lors des campagnes de terrain. Notre plus vive gratitude s'adresse à Richard Couture de CSSA Consultants Ltée et R. Grant Ingram de l'Université McGill pour leurs judicieux conseils lors de la préparation du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- CSSA. 1987. Études océanographiques physiques et physico-chimiques dans la baie James en 1987. Unpubl. ms. Available at Société d'énergie de la Baie James, 800 est boul. de Maisonneuve, Montréal, Québec H2L 4M8. 89 p.
- FREEMAN, N.G. 1982. Measurement and modelling of freshwater plumes under an ice cover. Bayfield Laboratory Manuscript Series no. 14. Unpubl. ms. Available at Department of Fisheries and Oceans, P.O. Box 5050, Burlington, Ontario L7R 4A6. 155 p.
- _____ et FLEMMING, B.M. 1982. James Bay/La Grande oceanographic data report, winter 1980. Vols. I and II. Bayfield Laboratory Data Report 82-4 and 82-5. Unpubl. ms. Available at Department of Fisheries and Oceans, P.O. Box 5050, Burlington, Ontario L7R 4A6.
- FREEMAN, N.G., ROFF, J.C., et PETT, R.J. 1982. Physical, chemical, and biological features of river plumes under an ice cover in James and Hudson Bays. *Naturaliste canadien* 109(4):745-764.
- GODIN, G. 1972. The analysis of tides. Toronto: University of Toronto Press. 264 p.
- INGRAM, R.G. 1981. Characteristics of the Great Whale River plume. *Journal of Geophysical Research* 86(C3):2017-2023.
- _____. 1983. Salt entrainment and mixing processes in an under-ice river plume. In: Gade, H.G., Edwards, A., and Svendsen, H., eds. *Coastal Oceanography*. New York: Plenum Press. 551-564.
- _____ et LAROUCHE, P. 1987a. Changes in the under-ice characteristics of La Grande Rivière plume due to discharge variations. *Atmosphere-Ocean* 25(3):242-250.
- _____. 1987b. Variability of an under-ice river plume in Hudson Bay. *Journal of Geophysical Research* 92(C9):9541-9547.
- INGRAM, R.G., LEPAGE, S. et SHIRASAWA, K. 1987. Under-ice plume dynamics. *Proceedings of the Third Symposium on Stratified Flows*. Pasadena, California. In press.
- PRINSENBERG, S.J. 1988. Ice-cover and ice-ridge contributions to the freshwater contents of Hudson Bay and Foxe Basin. *Arctic* 41(1):6-11.
- ROCHE. 1984. Répercussions biophysiques dans l'estuaire de La Grande Rivière et sur la côte nord-est. Volume I. Calibration du modèle de distribution des isohalines de surface en hiver. Unpubl. ms. Available at Société d'énergie de la Baie James, 800 est boul. de Maisonneuve, Montréal, Québec H2L 4M8. 32 p.