

GM 35064

DYNAMIQUE ET CARACTERISTIQUES DES GLACES DE DERIVE AU LARGE DE CAP-DU-DAUPHIN

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



Licence

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources
naturelles

Québec 

DYNAMIQUE ET CARACTERISTIQUES
DES GLACES DE DERIVE AU
LARGE DE CAP-DU-DAUPHIN
ILES-DE-LA-MADELEINE.

préparé pour

S.O.Q.U.E.M.,
2406 Quatre-Bourgeois
Sainte-Foy, G1V-1W5

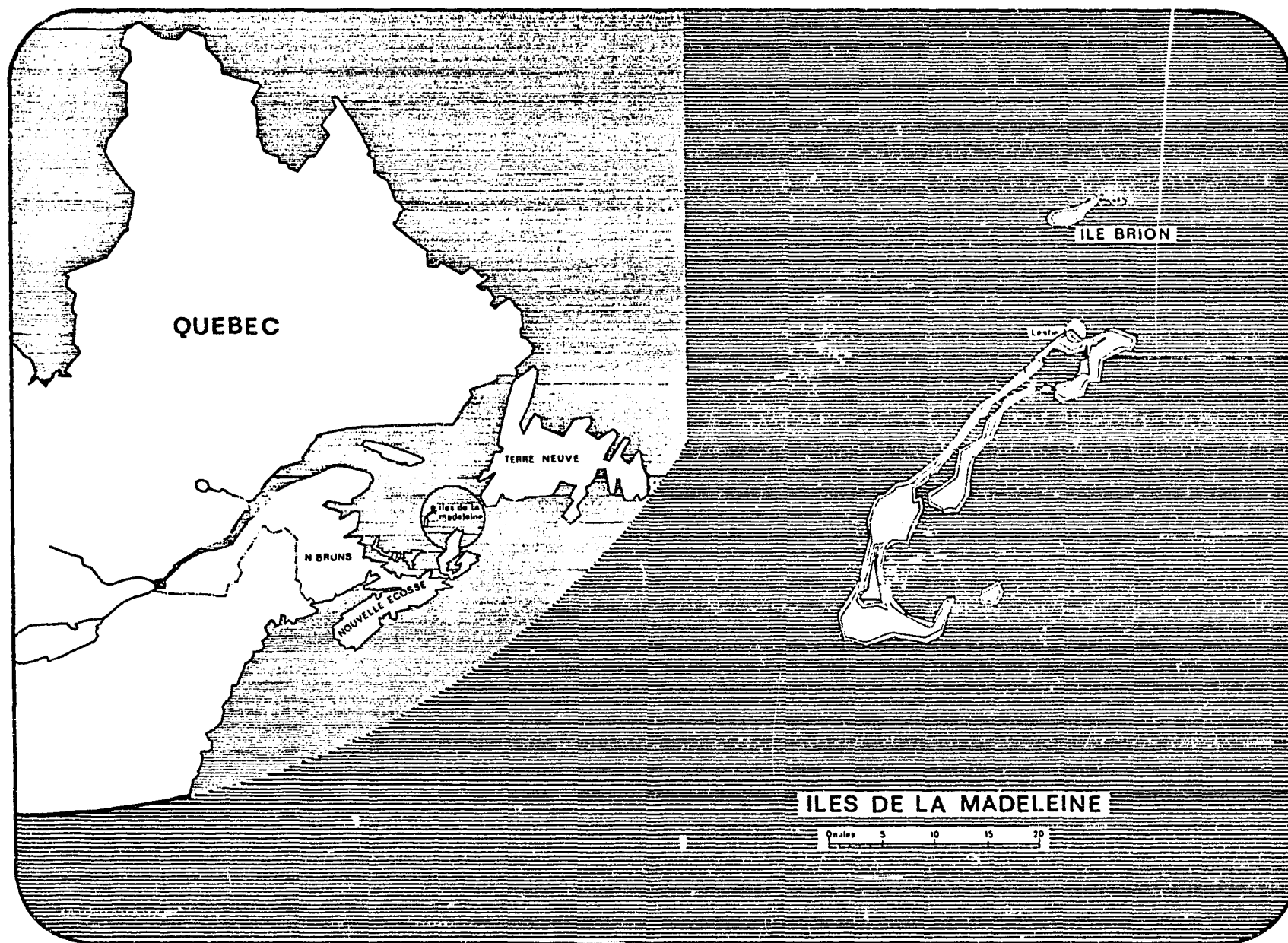
préparé par

DONALD CARTER, D.Sc.
Ingénieur-Conseil
1281 Ave Bishop
Ste-Foy, Québec
Tél.: (418) 656-0690

Juillet 1976.

Ministère de l'Énergie et des Ressources
Gouvernement du Québec
Documentation Technique

DATE: 14 NOV. 1979
No. G.M.: 35064



PLAN DE LOCALISATION.

TABLE DES MATIERES.

1.:	INTRODUCTION.....	1
1.1.:	Buts et Structure du rapport.....	1
1.2.:	Récapitulation des conclusions.....	2
2.:	PARAMETRES METEOROLOGIQUES ET HYDROGRAPHIQUES.....	6
2.1.:	Données météorologiques.....	6
2.2.:	Paramètres hydrographiques.....	12
3.:	ORIGINE ET PROGRESSION DES GLACES DE DERIVE.....	16
4.:	DYNAMIQUE DES GLACES DE DERIVE.....	20
5.:	DISTRIBUTION ET CONCENTRATION DES GLACONS.....	30
6.:	CARACTERISTIQUES ET POUSSEES DES GLACES.....	39
6.1.:	Caractéristiques.....	39
6.2.:	Propriétés mécaniques.....	44
6.3.:	Poussée sur les ouvrages maritimes.....	47
7.:	NAVIGATION HIVERNALE.....	50
8.:	CONCLUSION.....	52
	REFERENCES.....	53

ANNEXE A

1.: INTRODUCTION

1.1.: BUTS ET STRUCTURE DU RAPPORT

La mise en valeur des immenses gisements de sel des Iles-de-la-Madeleine nécessite la construction d'installations portuaires dans la région de Leslie, au Nord de l'archipel. Ces installations devront être conçues pour résister aux contraintes engendrées par l'action de la glace. Le présent rapport s'attachera principalement à identifier les conditions moyennes et les conditions les plus défavorables de glace qui prévalent dans le secteur où sera éventuellement implanté le port projeté. Plus particulièrement, les facettes qui seront traitées sont:

- a) les paramètres météorologiques et hydrographiques qui gouvernent les conditions de glace;
- b) l'origine et la formation des glaces de dérive dans le Golfe du St-Laurent;
- c) la dynamique des glaces de dérive dans la région de Leslie;
- d) la distribution et la concentration des glaçons dans le secteur sous étude;
- e) les propriétés mécaniques de la glace et les forces exercées sur les ouvrages;
- f) les entraves à la navigation hivernale.

1.2.: RECAPITULATION DES CONCLUSIONS ET DES OBSERVATIONS

1.2.1.: Climat

En raison de son caractère maritime, le climat d'hiver des Iles-de-la-Madeleine est moins rigoureux que celui des autres ports le long du St-Laurent. L'accumulation des degrés-jours de gel y est d'environ 2.33 fois moins élevée qu'à Sept-Iles. Cependant, suite à l'exposition extrême aux vents du Golfe, la fréquence des vents forts et soutenus y est très élevée. En général, les vents soufflent du Nord-Ouest mais on observe aussi quelques tempêtes en provenance du Sud-Est.

1.2.2.: Courants

L'archipel madelinot se situe légèrement à l'Ouest d'un point amphidromique. C'est pourquoi l'amplitude des marées y est relativement faible, ne dépassant pas 3 pieds. A proximité de Cap-du-Dauphin, les courants littoraux n'atteignent que 1 noeud et s'inversent suivant les cycles de la marée. Au large, la circulation générale des courants de surface se traduit par un mouvement d'Ouest en Est à une vitesse de l'ordre de 6 à 8 milles/jour.

1.2.3.: Formation des glaces de dérive

L'estuaire du St-Laurent, la Basse Côte Nord et la Baie des Chaleurs sont d'excellents pourvoyeurs de glaces de dérive. Les glaces apparaissent dans ces régions durant la première quinzaine de janvier et entreprennent alors, au gré des vents et des courants, leur périple vers le Détroit de

Cabot. L'effet combiné des vents et des courants se traduit en moyenne par une dérive de l'ordre de 10 milles/jour. Une analyse statistique portant sur la période 1958-1976 montre qu'en moyenne, les glaces de dérive atteignent les Iles-de-la-Madeleine vers le 29 janvier. Au printemps, la période d'englacement autour des Iles-de-la-Madeleine se termine, selon les observations faites depuis 1953, vers le 9 avril.

1.2.4.: Dynamique des glaces de dérive

En règle générale, les glaçons au large de Leslie dériveront au gré des vents et des courants. Dans la zone abritée par le Cap-du-Dauphin, le couvert de glace est plus stable et n'est déporté vers le large que par de forts vents en provenance du secteur Sud. A l'interface entre le couvert stable et le champ de glace à la dérive, il se produit une zone de cisaillement qui provoque des amoncellements de glace semblables à des crêtes de pression. Les installations projetées iront toutefois rejoindre le secteur où les glaces sont en mouvement.

1.2.5.: Distribution et concentration des glaçons

La dérive générale des glaçons dans le secteur des Iles-de-la-Madeleine se traduit par un mouvement de l'Ouest vers l'Est de l'ordre de 10 milles/jour. La côte Ouest de l'archipel est constamment soumise à l'assaut des glaces. Aux extrémités Nord et Sud de l'archipel, les concentrations de glaces flottantes augmentent pour permettre le passage des glaçons déviés de leur course par les Iles. La côte Est voit se prolonger, de façon presque permanente, un sillage d'eau claire dans le champ de glace.

1.2.6.: Caractéristiques et poussées des glaces

La glace formée au voisinage des Iles-de-la-Madeleine a une épaisseur qui peut atteindre environ 30 pouces. Cependant, on y rencontre fréquemment des glaçons formés dans la partie Nord-Ouest du Golfe dont l'épaisseur maximale de glace solide est de 40 pouces. La structure cristallographique de la glace de mer solide est colonnaire et l'orientation de l'axe optique des grains est horizontale. La teneur en sel dans la glace est d'au moins 2 parties par 1,000 (en poids). La poussée maximale que ce type de glace peut exercer sur une longue structure verticale peut s'élever jusqu'à 33,500 lbs/pi.lin. (50 tonnes métriques/mètre). De plus, les ouvrages doivent être conçus de façon à pouvoir résister en tout point à la contrainte ultime de la glace, 300 lbs/po² (20 Kg/cm²).

1.2.7.: Navigation hivernale

A une cinquantaine de milles au Nord des Iles-de-la-Madeleine, il y a une route maritime qui, même en hiver, est relativement achalandée, en moyenne 6 navires par jour. Un navire de classe spéciale apte à naviguer dans les glaces pourrait selon toute vraisemblance rallier le port projeté de Leslie, quitte à subir, en février et mars, quelques retards et à devoir, en certaines occasions, avoir recours à l'assistance de brise-glace qui patrouillent le secteur en permanence durant l'hiver.

Aux abords immédiats, les navires devront franchir une zone où la concentration des glaces est relativement élevée. L'archipel madelinot placé presque perpendiculairement à la dérive d'Ouest en Est des glaçons agit à la façon d'un

défecteur et on observe une concentration accrue de glaces à ses extrémités Nord et Sud. Un port situé sur la côte Est de l'archipel aurait ses abords immédiats libres de glace presque en permanence et serait d'accès beaucoup plus facile durant l'hiver.

2.: PARAMETRES METEOROLOGIQUES ET HYDROGRAPHIQUES

Les paramètres météorologiques et hydrographiques ont une influence directe sur les caractéristiques et la dynamique des glaces de dérive. Dans le présent chapitre, nous présenterons donc ces données qui seront utiles tout au cours de notre étude.

2.1.: _ DONNEES METEOROLOGIQUES

Le climat des Iles-de-la-Madeleine peut se qualifier de maritime par suite de ses températures moins élevées en été et moins basses en hiver que celles enregistrées en territoire continental de même latitude. De plus, le décalage d'un mois des valeurs thermométriques extrêmes, le fort pourcentage d'humidité, la fréquence des brouillards ainsi que la régularité des vents confirment d'ailleurs le caractère maritime de ce climat.

On procède à des observations météorologiques depuis 1901 aux Iles-de-la-Madeleine et les données recueillies depuis 1933 sont conformes aux normes universellement acceptées.

La station météorologique se situe à environ une vingtaine de milles de l'emplacement du port projeté. On peut donc considérer que les valeurs qui y sont observées sont représentatives du climat qui prévaut à Leslie.

Nous examinerons les principaux paramètres reliés aux températures, aux précipitations et aux vents qui présentent de l'intérêt pour notre étude des conditions de glace et de

la navigation hivernale au large de Leslie, au Nord de l'archipel des Iles-de-la-Madeleine.

2.1.1.: Températures

En raison de leur situation océanique, la température des Iles-de-la-Madeleine est moins rigoureuse que celle des autres ports du St-Laurent. Le TABLEAU 2.1 et la figure 2.1 présentent pour fins de comparaison les températures mensuelles moyennes observées aux Iles-de-la-Madeleine, à Sept-Iles, à Québec et à Montréal. On remarque, en raison du caractère maritime du climat, que les températures maximale et minimale sont décalées d'un mois par rapport aux autres ports du St-Laurent.

En général, la température moyenne s'abaisse en dessous de 0°C vers le 30 novembre et ne remonte à cette valeur que le 12 avril. La durée moyenne de la période de gel est donc de 133 jours.

Dans les études de formation et de croissance des champs de glace, on a habituellement recours à la notion de degrés-jours de gel. Un degré-jour de gel correspond à une journée où la température moyenne est de 1 degré sous le point de congélation. La déviation standard calculée à partir des degrés-jours de gel observés au cours de la période 1933-1976 permet aussi d'établir une certaine classification des hivers. Lorsque l'accumulation des degrés-jours de gel se situe à l'intérieur d'une déviation standard de part et d'autre de la moyenne, l'hiver est considéré comme normal. Si l'accumulation des degrés-jours de gel est supérieure ou inférieure à ces limites, l'hiver est respectivement considéré

TABLEAU 2.1.

Températures moyennes (°F.)

MOIS \ PORTS	CAP-AUX-MEULES.	SEPT-ILES.	QUEBEC.	MONTREAL.
JANVIER	20.7	7.1	13.0	16.3
FEVRIER	18.7	8.4	14.8	18.0
MARS	24.2	19.8	25.4	28.3
AVRIL	32.8	31.7	39.0	43.1
MAI	42.4	42.9	52.3	56.5
JUIN	52.0	52.9	62.5	66.0
JUILLET	61.8	59.6	57.9	70.8
AOUT	62.5	58.2	65.9	68.9
SEPTEMBRE	55.8	50.2	57.0	60.1
OCTOBRE	46.0	39.0	45.9	49.0
NOVEMBRE	36.6	26.2	32.6	36.2
DECEMBRE	26.6	11.1	17.5	21.3
NOYENNE	40.0	34.0	41.2	44.5

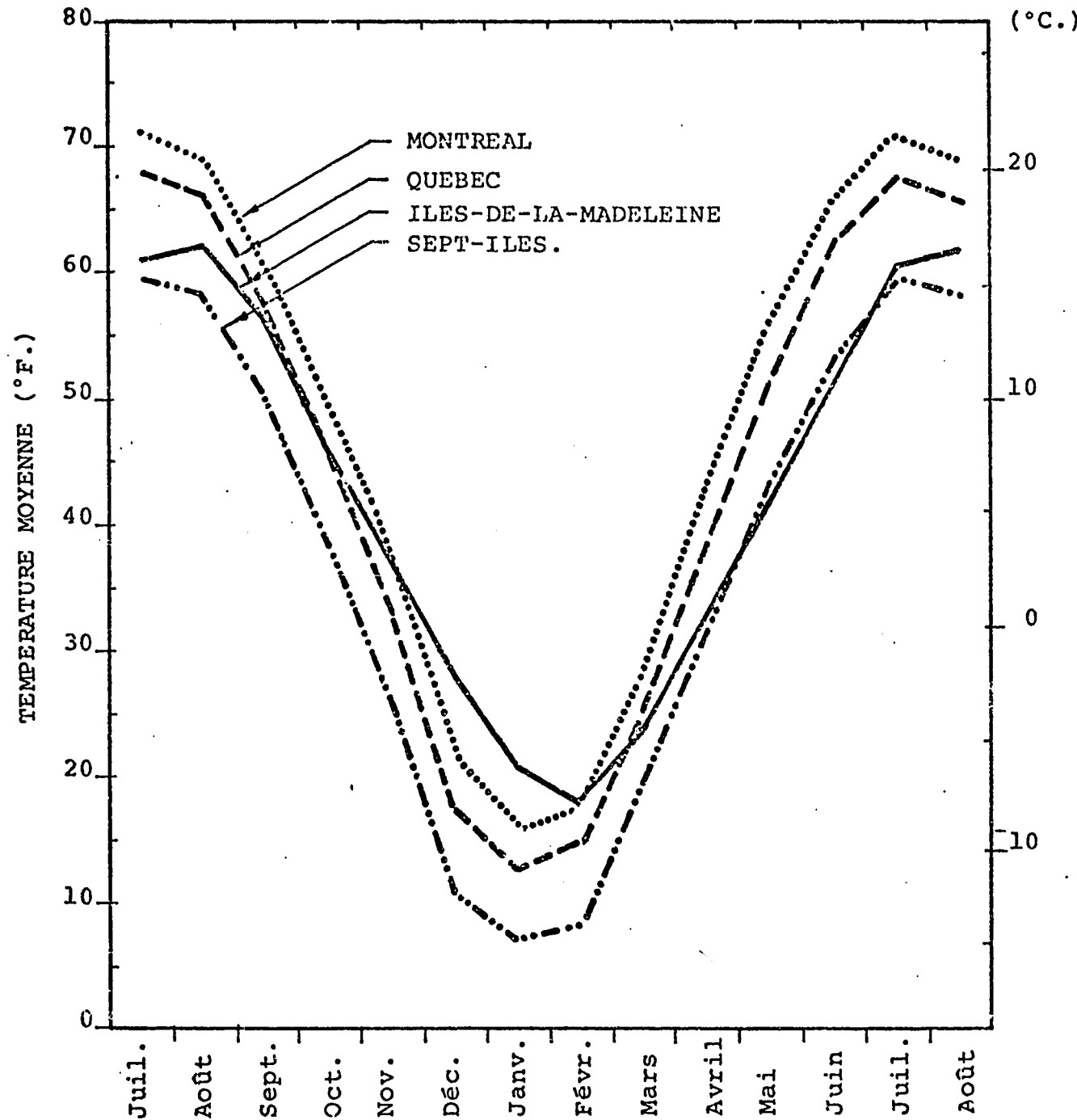


Figure 2.1.: Températures moyennes observées à Montréal, Québec, Sept-Iles et aux Iles-de-la-Madeleine.

comme rigoureux ou clément. Cette classification implique qu'en moyenne, il y a sur une période de cinq ans, un hiver clément, trois hivers normaux et un hiver rigoureux. La figure 2.2 présente l'indice de gel moyen observé aux Iles-de-la-Madeleine. Cet indice de gel, pour un hiver moyen, se situe entre 417 et 771°C-jours de gel (750 et 1,400°F-jours de gel) et la valeur moyenne est de 594°C-jours (1,070°F-jours). Une comparaison entre les indices de gel observés en différents endroits le long du St-Laurent est présentée au TABLEAU 2.2.

TABLEAU 2.2

INDICES DE GEL OBSERVES EN DIFFERENTS ENDROITS

LOCATIONS	INDICE DE GEL (°C-JOURS)	
	Valeur moyenne	Hiver normal
Iles-de-la-Madeleine	600	420 - 880
Sept-Iles	1,400	1,150 - 1,650
Québec	1,100	900 - 1,300
Montréal	825	675 - 975

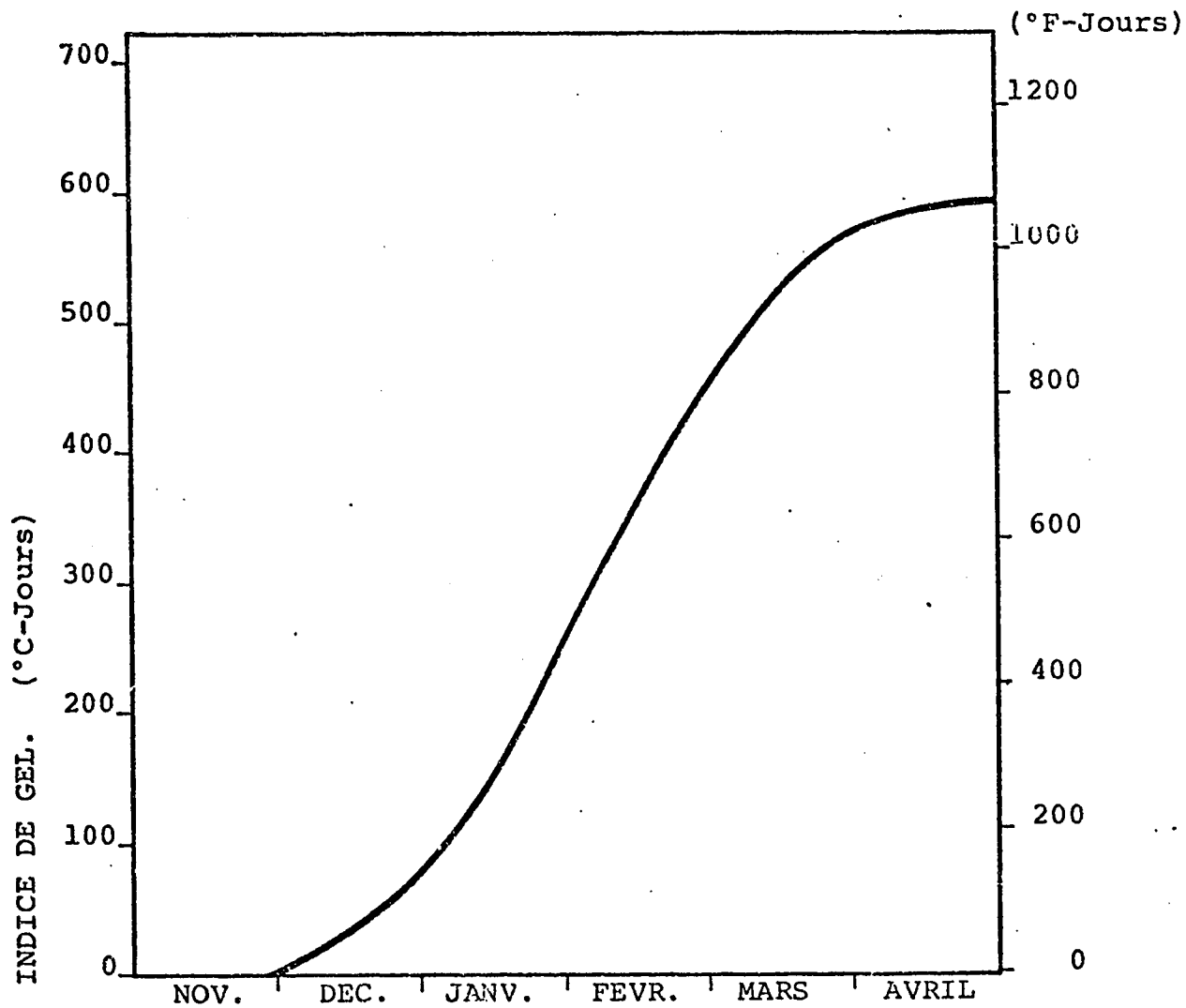


Figure 2.2.: Indice de Gel aux Iles-de-la-Madeleine.

2.1.2.: Vents

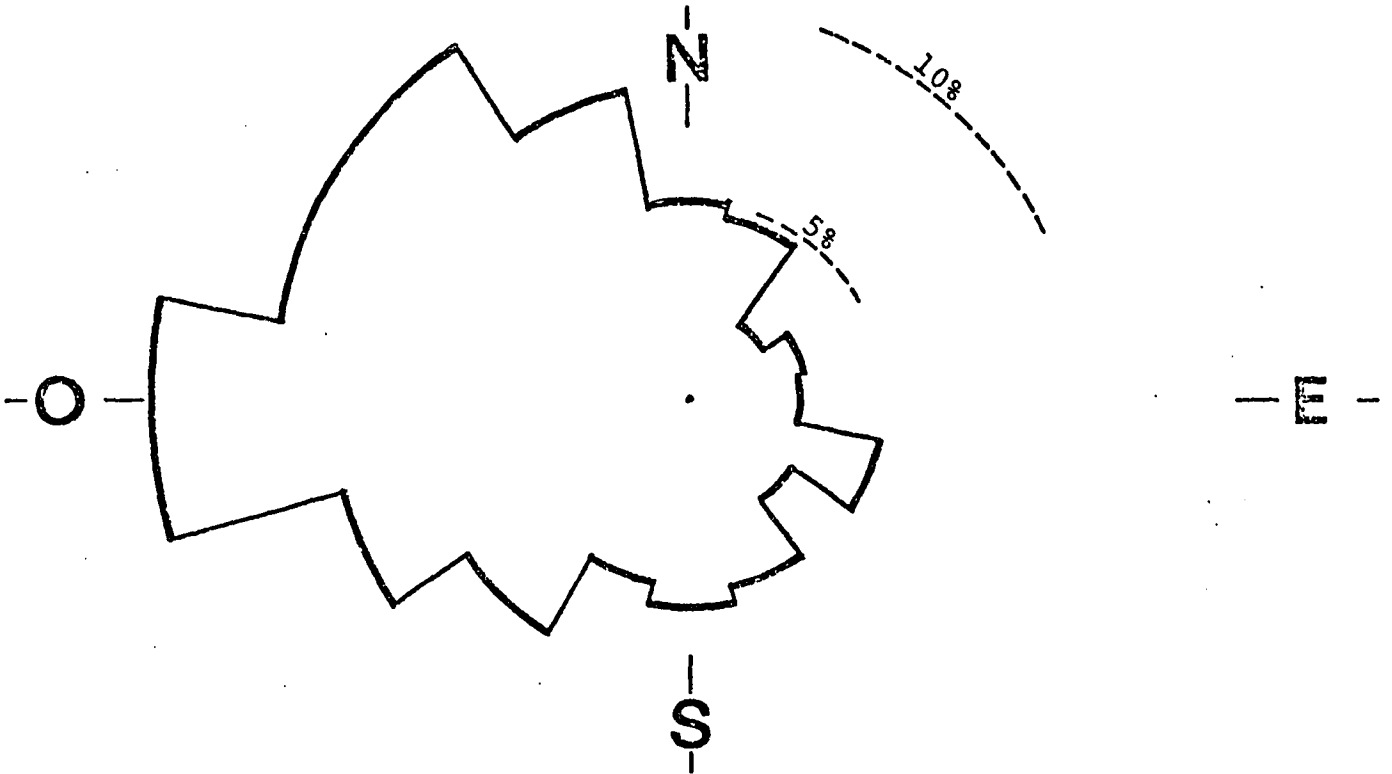
Exemple typique d'exposition extrême aux vents du Golfe du St-Laurent, la station des Iles-de-la-Madeleine présente une fréquence très élevée de vents forts et soutenus. La moyenne annuelle des vitesses du vent s'élève à 22 mph. Pour les mois les moins venteux de juillet et d'août, la vitesse moyenne atteint encore 18 mph. Pour les mois d'hiver, janvier, février et mars, les vitesses moyennes du vent sont respectivement 25, 23 et 22 mph. La figure 2.3 présente, pour chaque direction principale de la rose des vents, la fréquence et la vitesse d'un vent provenant de cette direction pour les mois de janvier, février et mars. On constate que les vents soufflant de l'Ouest et du Nord-Ouest sont de loin les plus fréquents au cours de l'hiver. On remarque aussi que les vents provenant du Nord-Ouest et du Sud-Est sont les plus violents.

2.2.: PARAMETRES HYDROGRAPHIQUES

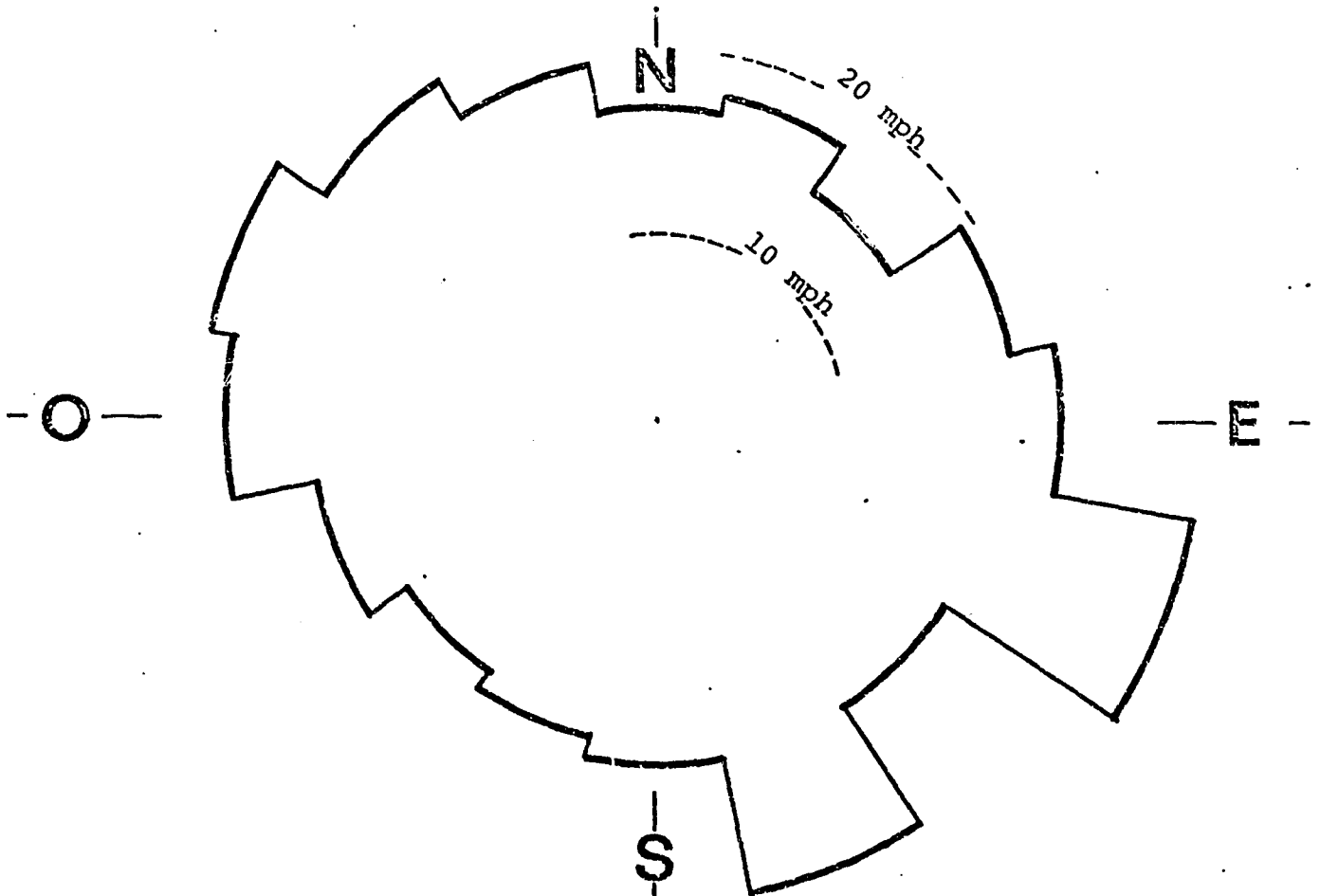
Dans l'optique de l'étude de la dérive des glaçons, les marées et les courants revêtent une importance capitale car ce sont eux qui, en premier lieu, gouvernent la dynamique générale et la concentration des glaces.

2.2.1.: Marées

Dans le Golfe du St-Laurent, il y a, légèrement à l'Ouest des Iles-de-la-Madeleine, un point amphidromique où l'amplitude des marées est pratiquement nulle. Pour cette raison, les marées aux Iles-de-la-Madeleine sont de faible amplitude. Au Nord de l'archipel, l'amplitude moyenne des



a) Fréquence des vents d'hiver (janvier, février, mars)



b) Vitesses (mph) des vents d'hiver. (janvier, février, mars)

Figure 2.3.

marées est de 2 pieds (0.6 m.) et les marées de vive-eau ont une amplitude de 3 pieds (1.0 m.).

2.2.2.: Courants

L'INRS-Océanologie, Rimouski⁽¹⁾, a effectué, au cours des grandes marées de septembre 1975, des mesures des courants de surface à proximité de Cap-du-Dauphin. Les courants littoraux observés au cours de ces expériences semblent contrôlés par la marée. Au cours de la marée montante, les courants vers l'Ouest peuvent, par moment, atteindre 1 noeud, la vitesse moyenne se situe cependant aux environs de 0.5 noeud. A marée baissante, les courants sont dirigés vers l'Est et ont une vélocité de l'ordre de 0.7 noeud.

Pour être rigoureux, il faut signaler qu'actuellement nous ne disposons que de très peu de mesures qui ont toutes été prises au cours de l'été. Il est cependant peu probable que la circulation d'hiver des courants diffère de façon appréciable du régime général des courants d'été. En résumé, les courants littoraux, au site des installations portuaires projetées, sont relativement faibles ne dépassant pas 1 noeud et s'inversent suivant les cycles de la marée. La figure 2.4 qui reproduit les courants de surface observés en été indique que la circulation générale au large de Leslie coule d'Ouest en Est à une vélocité de l'ordre de 5 milles nautiques par jour.

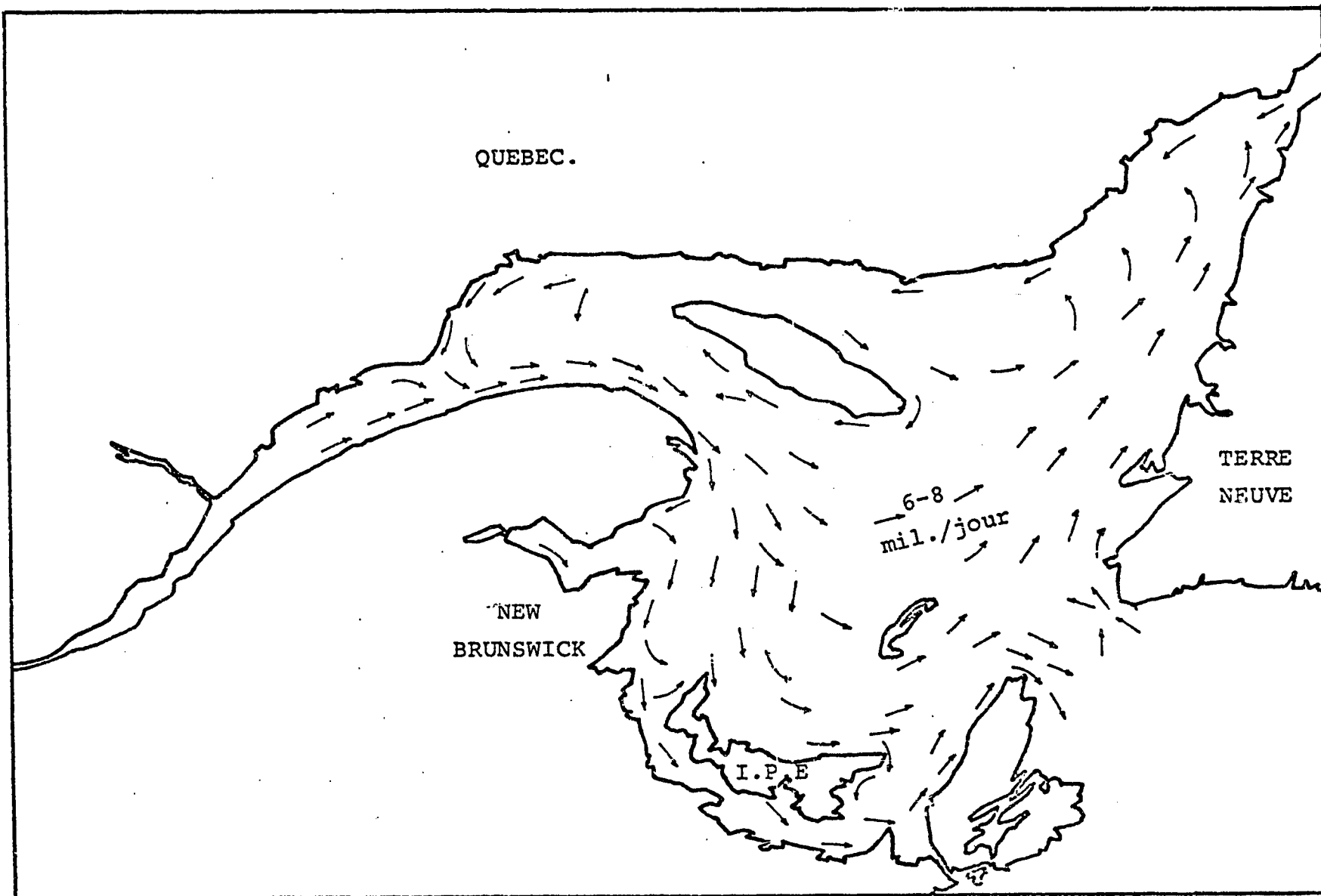


Figure 2.4.: Circulation générale des courants de surface dans le Golfe du St-Laurent.

3.: ORIGINE ET PROGRESSION DES GLACES DE DERIVE

Les conditions de glace dans le Golfe du St-Laurent peuvent varier beaucoup d'une année à l'autre. Par exemple, au cours des hivers 1958 et 1960, on n'a pratiquement pas observé de glaces de dérive dans le Golfe. Par contre, au cours de l'hiver 1959, les conditions de glace furent particulièrement sévères sur toute la surface du Golfe.

Une faible augmentation de la salinité et de la température de l'eau du Golfe se traduit par d'énormes quantités de chaleur qui doivent être extraites avant la formation de glace. Même si plusieurs facteurs affectent le processus d'englacement du Golfe du St-Laurent, on observe néanmoins une bonne corrélation entre la température et les conditions de glace. Aux hivers les plus rigoureux correspondent les conditions de glace les plus sévères.

Depuis 1958, différents ministères fédéraux se sont relayés pour dresser les cartes indiquant l'état des glaces dans le Golfe et le fleuve St-Laurent. Présentement, les vols de reconnaissance ont lieu 3 fois par semaine.

L'examen des cartes, couvrant une période de 19 ans, permet d'établir certaines tendances qui semblent se manifester systématiquement d'une année à l'autre.

Les régions du Détroit de Belle-Isle, de la Côte Nord, de la vallée du St-Laurent et de la Gaspésie ont des températures plus froides que les autres parties du Golfe et se révèlent d'excellents pourvoyeurs en glaces de dérive.

Au début de janvier, la glace apparaît, dans ces régions, le long des côtes et dans les baies. La figure 3.1 basée sur les 19 années d'observations de l'englacement du Golfe du St-Laurent montre la progression moyenne des champs de glace. La figure 3.2, basée sur la période 1953-1976, fait voir le retrait, au printemps, des champs de glace dans le Golfe. Les Iles-de-la-Madeleine sont, en moyenne, entourées par les glaces de dérive du 29 janvier au 9 avril.

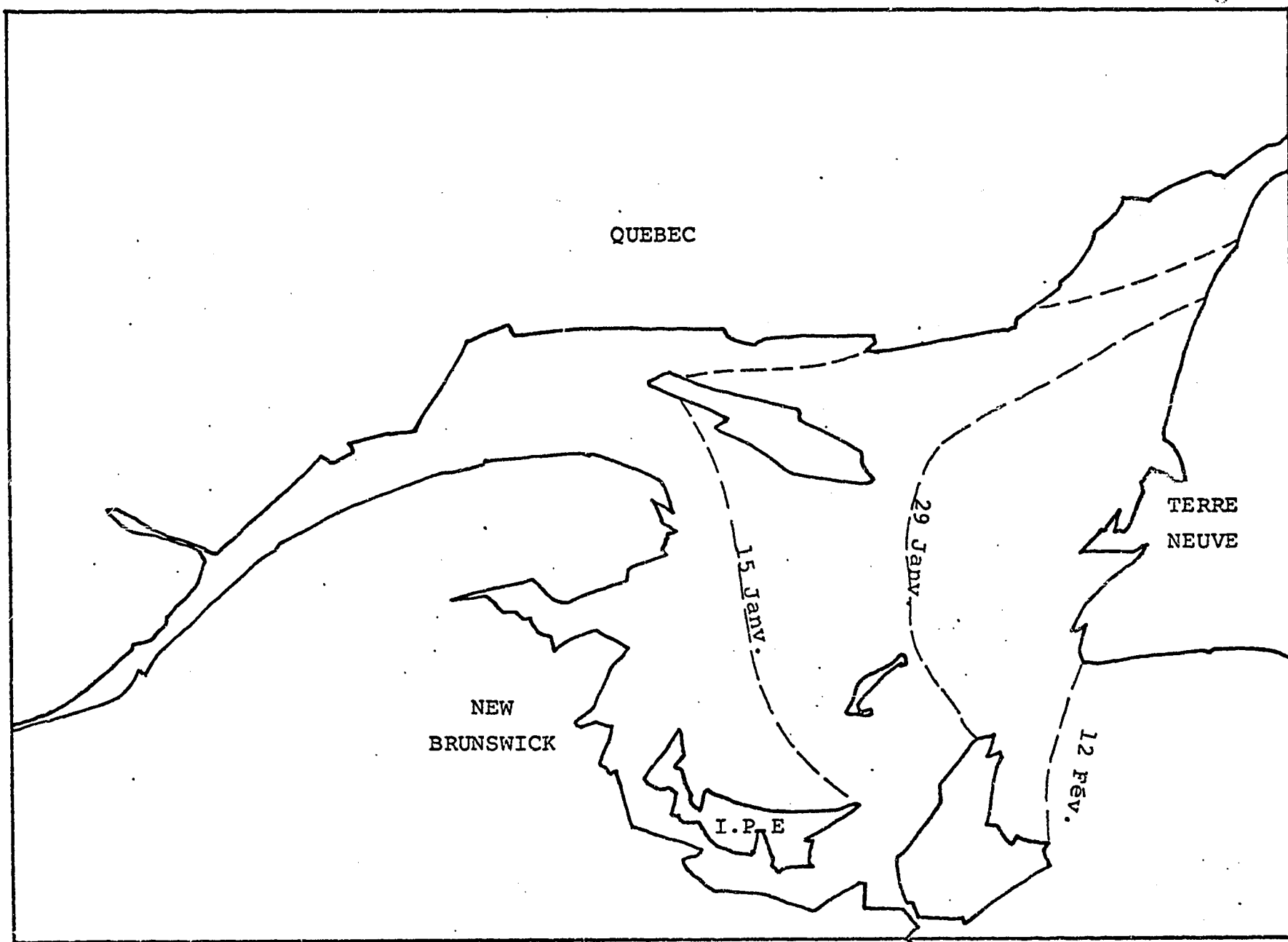


Figure 3.1.: Avance des champs de glaces flottantes au début de l'hiver.

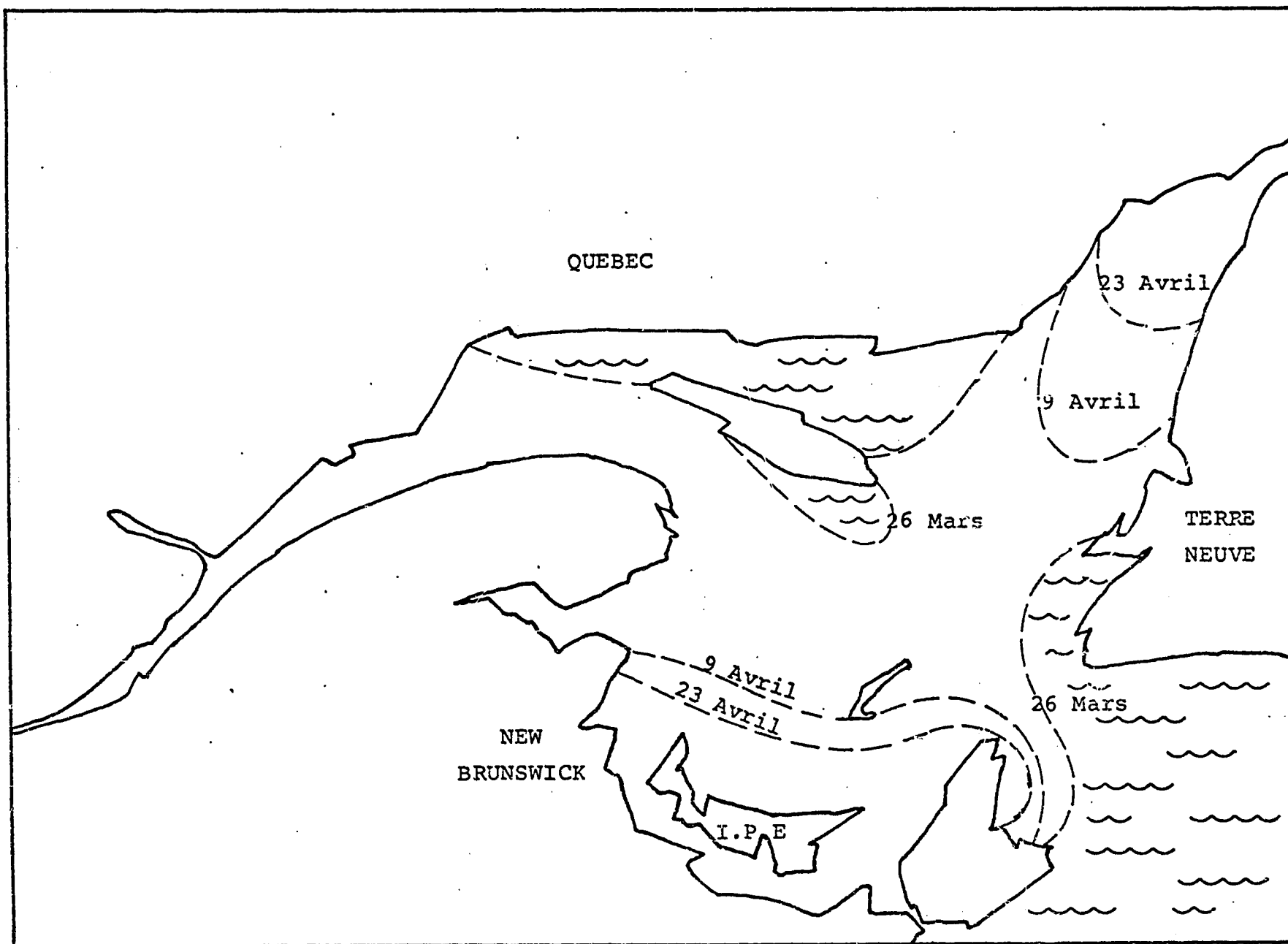


Figure 3.2.: Retrait des champs de glaces flottantes à la fin de l'hiver.

4.: DYNAMIQUE DES GLACES DE DERIVE

Les contraintes tangentiellles exercées par les courants et les vents sur un glaçon stationnaire s'écrivent respectivement: ⁽²⁾

$$\tau_1 = \frac{1}{100} U^2 \quad (\text{lbs/pi}^2)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{90,000} W^2 \quad (\text{lbs/pi}^2)$$

- où
- τ_1 = contraintes tangentiellles exercées par les courants;
 - τ_2 = contraintes tangentiellles exercées par les vents;
 - U = vitesse des courants exprimée en mph;
 - W = vitesse des vents exprimée en mph.

A l'état permanent, la somme des forces exercées sur un glaçon doit s'annuler. Cette condition permet d'écrire:

$$\frac{1}{100} [U - V_1]^2 = \frac{1}{90,000} V_1^2$$

$$\frac{1}{90,000} [W - V_2]^2 = \frac{1}{100} V_2^2$$

- où
- V_1 = composante de la vitesse de dérive dans la direction des courants (mph);
 - V_2 = composante de la vitesse de dérive dans la direction des vents (mph).

Dans les deux équations précédentes, le membre de gauche représente la force tractrice alors que le membre de droite correspond à la force retardatrice. De ces équations, on peut tirer, pour un glaçon isolé, les relations suivantes:

$$V_1 = \frac{30}{31} U \quad (\text{mph})$$

$$V_2 = \frac{1}{31} W \quad (\text{mph})$$

Par temps calmes ($W = 0$), la vitesse de dérive d'un glaçon isolé correspond à $(30/31)$ 96.8% de la vitesse du courant.

Lorsque le courant est nul ($U = 0$), la vitesse de dérive d'un glaçon isolé correspond à $(1/31)$ 3.2% de la vitesse du vent. De façon plus générale, la vitesse de dérive d'un glaçon isolé est donnée par la somme vectorielle des composantes dues au vent et au courant.

Sous les conditions naturelles, la situation est plus complexe que le cas d'un glaçon isolé considéré précédemment. En effet, les glaçons s'entrechoquent les uns les autres, dissipant ainsi une partie de leur énergie cinétique. La fréquence des chocs est alors fonction de la concentration des glaçons. Pour tenir compte des glaçons avoisinants, la vitesse de dérive d'un glaçon isolé doit être multipliée par le facteur suivant: ⁽³⁾

$$k = \sqrt{\frac{1}{1 + 7.68 N^2}}$$

où N est la fraction du plan d'eau qui est recouvert par les glaçons. La valeur de N varie donc de 0 pour un glaçon isolé à 1 pour une surface d'eau complètement recouverte de glaçons.

La figure 4.1 permet de déterminer directement la valeur des composantes de la vitesse de dérive dans la direction des courants et des vents en fonction de la concentration des glaçons.

On peut noter que pour annuler l'effet des courants, la vitesse des vents doit être 30 fois plus élevée et dans une direction opposée. C'est pourquoi les glaces sembleront généralement obéir en premier lieu aux courants de surface. A ce mouvement se surimposera l'effet des vents qui influera sur la concentration et la formation de zones de pression le long des côtes.

Lorsque la dérive des glaçons a une composante, résultant de l'action du vent, dirigée vers la rive, la situation est grandement compliquée le long de la côte. Nous y observons d'abord la concentration des glaçons augmenter graduellement et finalement atteindre la valeur maximale 1 qui correspond à un plan d'eau entièrement recouvert de glaçons.

La figure 4.2 schématise le mécanisme de formation d'une bande compacte le long d'une côte et définit les symboles utilisés dans notre analyse. La largeur, ℓ , de cette bande compacte peut s'écrire en fonction de la concentration initiale, N , de la composante de la vitesse de dérive vers la côte, V_3 , et du temps, t . La conservation de la matière

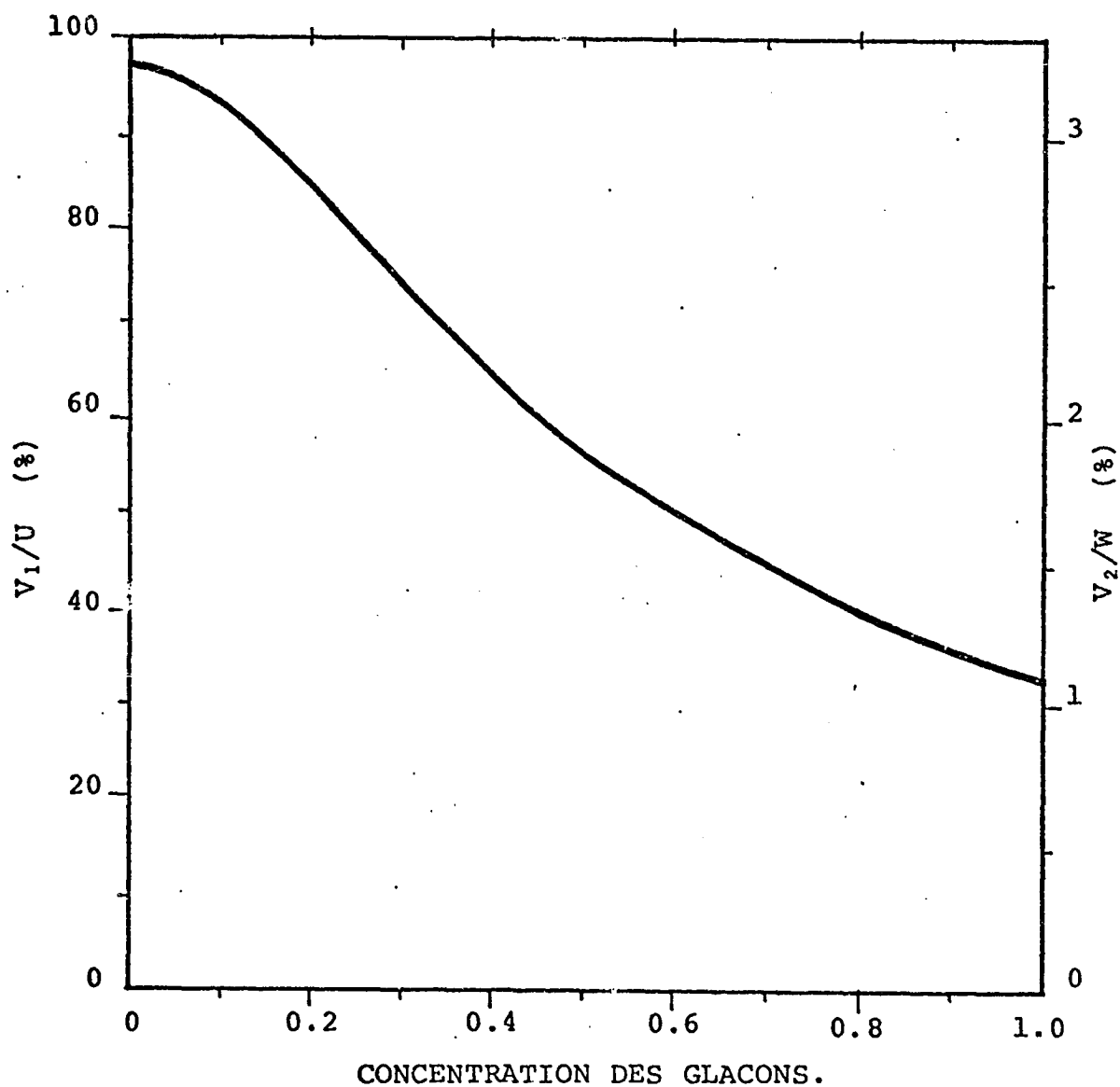


Figure 4.1.: Composantes de la vitesse de dérive des glaçons en fonction de la vitesse, U , des courants et de la vitesse, W , des vents ainsi que de la concentration des glaçons. Exemple: Quand la concentration est de 0.5, la composante due aux courants correspond à 56% de la vitesse du courant et la composante due aux vents correspond à 1.9% de la vitesse des vents.

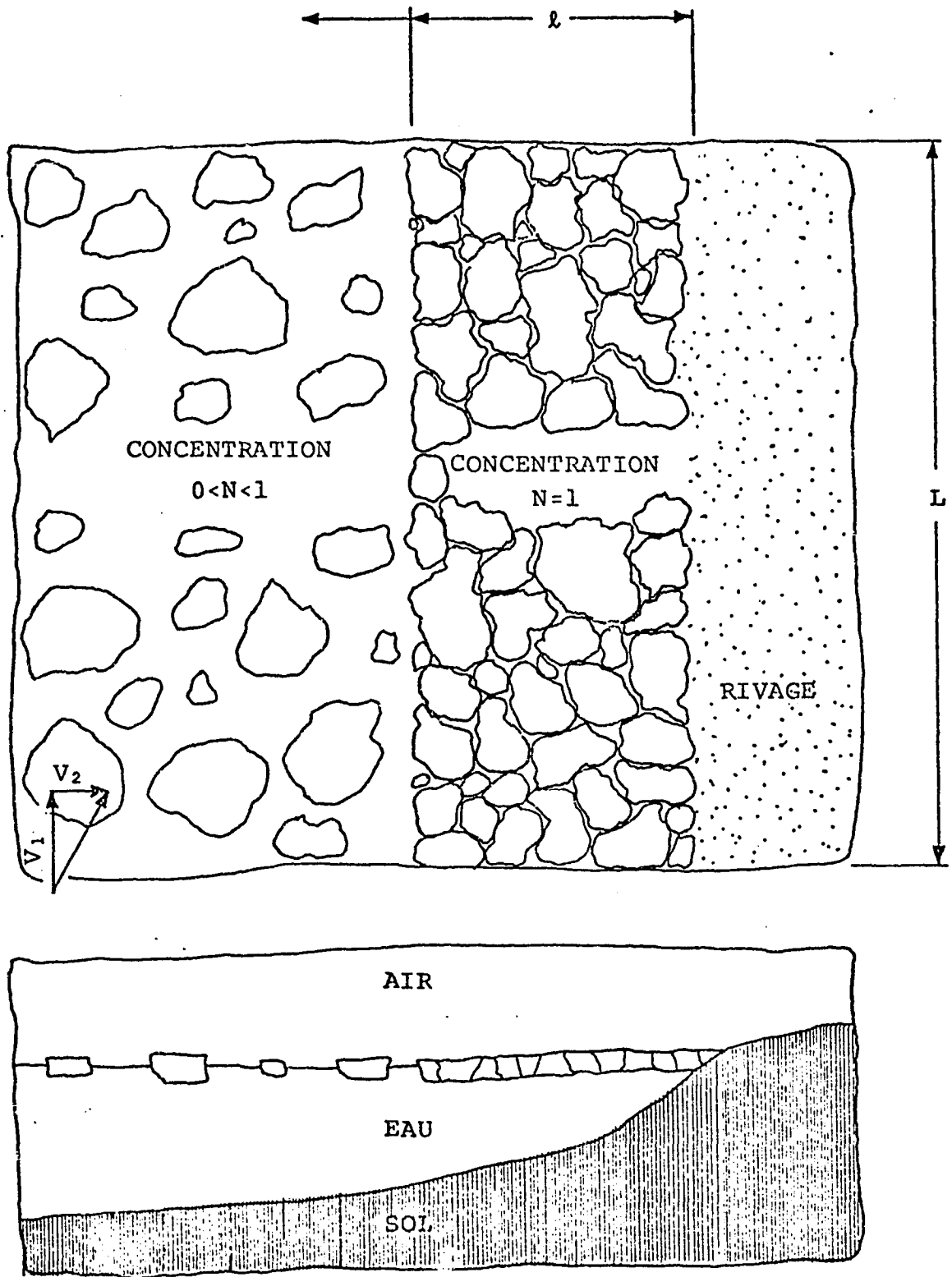


Figure.:4.2 Mécanisme de la formation d'une bande compacte le long des côtes.

implique:

$$N \times V_3 \times t = (1 - N) \times l$$

Cette équation indique que la quantité de glace qui est entrée dans la zone compacte est égale au volume qu'il manquait pour que la bande soit compacte.

La largeur de la bande comprimée contre la rive peut alors s'écrire:

$$l = \left\{ \frac{N}{1 - N} \right\} V_3 \times t$$

Pour que la bande comprimée contre la rive demeure stationnaire lorsque les vents soufflent vers la côte et que les courants sont parallèles à la rive, il faut:

$$\frac{\text{contraintes dues aux courants}}{\text{contraintes dues aux vents}} \leq \text{coefficient de friction des glaçons}$$

Le coefficient de friction des glaçons entr'eux est de l'ordre de 0.3. En substituant cette valeur ainsi que les relations obtenues précédemment pour les contraintes générées par les courants et les vents, nous obtenons:

$$W \geq 55 U$$

On constate donc qu'il faut des vents d'une intensité au moins 55 fois supérieure à la vitesse des courants littoraux pour que la zone de pression demeure stationnaire au large des côtes. Comme les courants littoraux au droit du site étudié sont de l'ordre de 1 mph, on doit conclure

qu'il ne s'y formera des bandes compactes stationnaires que si les vents soufflent du Nord ou du Nord-Ouest et ont une vélocité d'au moins 55 mph. L'examen des enregistrements des vents indique qu'aux Iles-de-la-Madeleine, il n'y a moins de 5 jours/année où les vents soufflent de façon continue à une vitesse supérieure à 55 mph. ⁽⁴⁾ La probabilité, d'une part, que ces forts vents soient favorablement orientés et, d'autre part, qu'ils surviennent pendant la période d'englacement est donc relativement faible. On doit donc conclure qu'en règle générale, les navires en direction de Leslie n'auront pas besoin de se frayer un passage à travers une bande compacte maintenue comprimée contre la côte. Les champs de glace dériveront généralement au gré des courants de surface et des vents. Dans les échancrures de la mer sur les côtes où les courants littoraux sont faibles, la glace forme un couvert stable. La figure 4.3 schématise le mouvement général des glaçons de dérive dans le secteur des installations portuaires projetées. Le champ de glace, dans la zone abritée par le Cap-du-Dauphin, est régulièrement morcelé par l'effet combiné des vagues et des courants. Les fragments sont dégagés vers le large lorsque les vents soufflent du Sud et qu'il n'y a pas de champs de glace qui les compriment contre la rive.

La planche 4.1 montre quelques détails de la zone de cisaillement qui se produit à l'interface entre le couvert stable et le champ de glace à la dérive. Cet amoncellement de glace pourrait s'avérer un obstacle sérieux au passage des navires en hiver si, dans la conception du port projeté, on ne tenait pas compte de la dynamique générale des glaces.

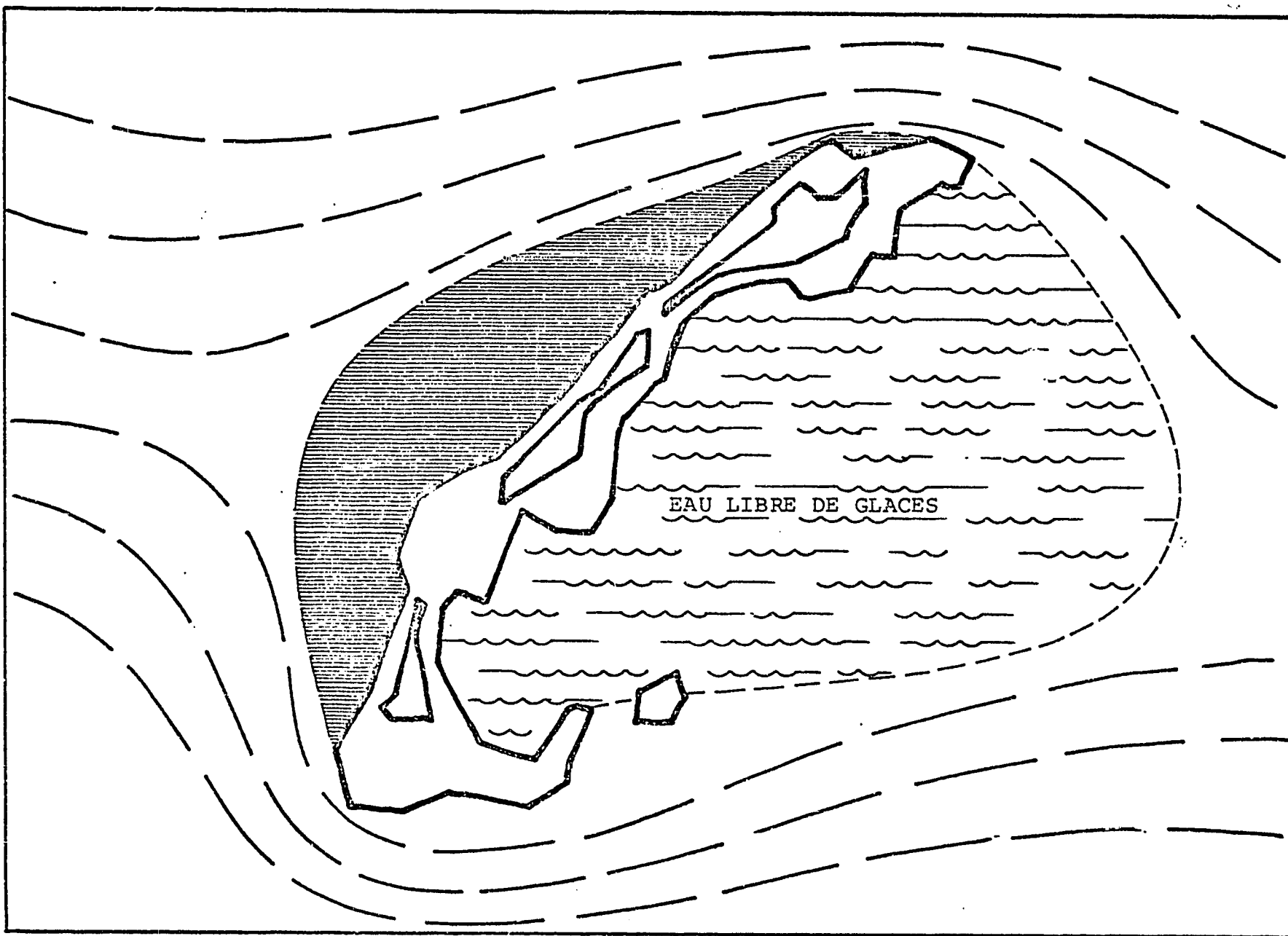
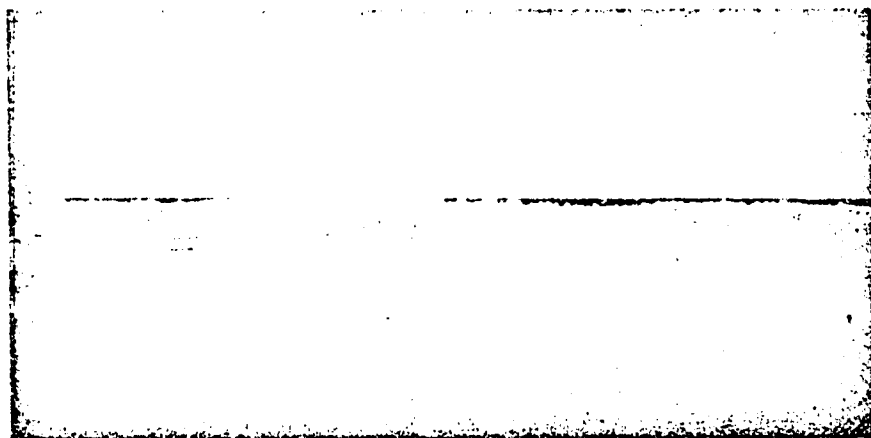
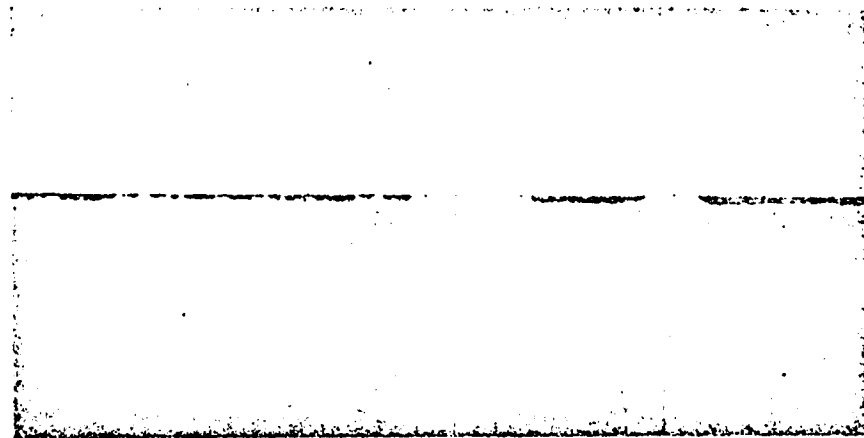


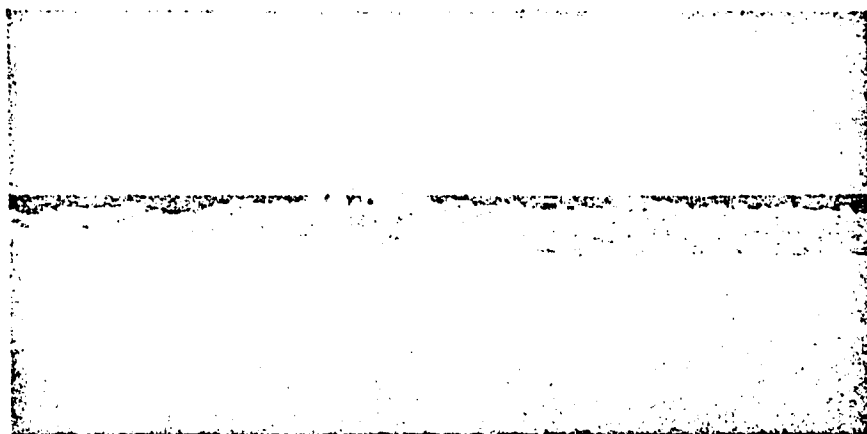
Figure 4.3.: Dérive générale des glaçons aux abords immédiats des Iles-de-la-Madeleine.



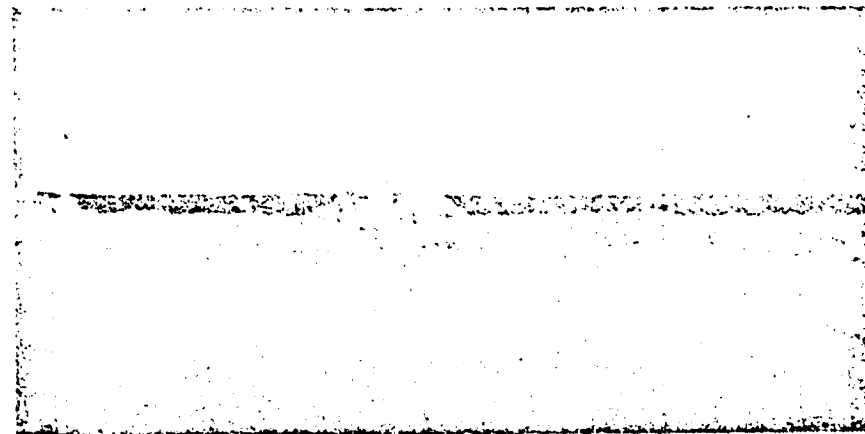
1.: Vue vers le nord du quai actuel.



2.: Vue vers l'est du quai actuel.



3.: Détail de la crête de pression.



4.: Détail de la crête de pression.

Il est cependant prévu, vu les exigences à rencontrer, que les digues s'étendront vers le large sur une distance suffisante pour aller rejoindre le secteur où les courants littoraux balayent les glaces flottantes.

Si nous considérons maintenant la dérive des glaces au large de Leslie. Nous constatons que l'effet combiné des vents et des courants se traduit en moyenne par un mouvement général des glaçons de l'Ouest vers l'Est à une vitesse de l'ordre de 10 milles/jour.

5.: DISTRIBUTION ET CONCENTRATION DES GLAÇONS

Au cours de l'hiver 1976, des photographies de l'état des glaces ont été prises aux abords immédiats du site des installations portuaires projetées. Ces photos sont reproduites dans l'annexe A. Le champ de glace dans la zone abritée par le Cap-du-Dauphin demeure relativement stable alors qu'au large les vents et les courants conjuguent leurs efforts pour déporter vers l'Est d'importantes concentrations de glaces de dérive. Pour avoir une vue à plus grande échelle de la dérive des glaçons, nous avons analysé les images prises par satellite. Ces images reproduites aux planches 5.1 à 5.8 montrent, pour différentes conditions de vent, la distribution et la concentration des glaçons au voisinage des Iles-de-la-Madeleine. Les glaces dans leur périple vers le Détroit de Cabot se butent à la côte Ouest de l'archipel. Les glaçons déviés de leur trajectoire sont évacués aux extrémités NE et SW des Iles-de-la-Madeleine. La côte SE voit se prolonger dans le champ de glace un sillage d'eau claire sur plusieurs milles. On peut observer que, sauf par de forts vents du SW, d'importantes concentrations de glaçons dérivent continuellement au large du site sous étude.



PLANCHE 5.1.: Image prise par satellite le 18 janvier 1973.

Un faible vent du SW de 5 mph entraîne les glaçons le long de la face NW de l'archipel. Les glaçons sont évacués, en grande concentration, entre l'Ile Brion et le Cap-du-Dauphin. La côte SE de l'archipel demeure libre de glaçons.



PLANCHE 5.2.: Image prise par satellite le 19 janvier 1973. Un fort vent du SW de 20 mph entraîne les glaçons le long de la face NW de l'archipel. L'effet combiné des vents et des courants permet un dégagement au large des côtes du Rocher-du-Dauphin. La côte SE de l'archipel demeure libre de glaçons.



PLANCHE 5.3.: Image prise par satellite le 6 février 1973. Un vent moyen du NW de 10 mph pousse les glaçons contre la côte NW de l'archipel. Une partie des glaçons déviés par l'archipel doit être évacuée au large du Cap-du-Dauphin où la concentration est très élevée. La côte SE de l'archipel demeure libre de glaçons.

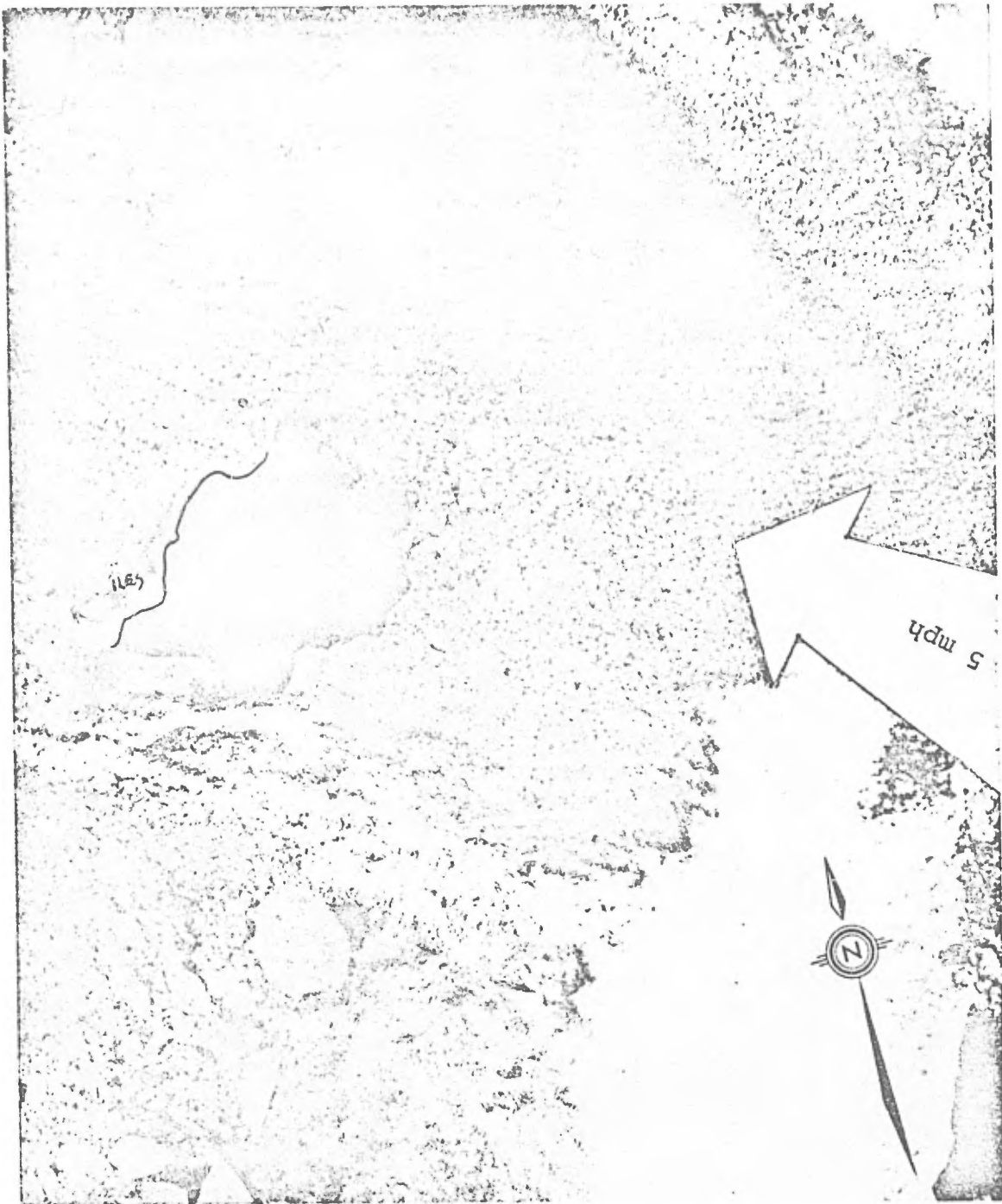


PLANCHE 5.4.: Image prise par satellite le 13 mars 1973.

Un faible vent du SE de 5 mph n'est pas suffisant pour contrer l'effet des courants qui déportent les glaçons vers l'Est. La concentration au large de Cap-du-Dauphin demeure élevée. Le sillage de l'archipel dans le champ de glace garde la face SE libre de glaces.



PLANCHE 5.5.: Image prise par satellite le 14 mars 1973. Un fort vent du SW de 25 mph se combine avec les courants pour entraîner les glaçons le long de la côte NW et les évacuer au large de Cap-du-Dauphin. La côte SE de l'archipel demeure libre de glaces.



PLANCHE 5.6.: Image prise par satellite le 31 mars 1973.
Un fort vent du NE de 20 mph concentre les glaçons subsistant à cette date dans la partie SW du Golfe. Les côtes de l'archipel sont, à toutes fins pratiques, déjà libres de glaces dans leurs abords immédiats.



PLANCHE 5.7.: Image prise par satellite le 19 février 1974. Un vent moyen du SW de 10 mph force les glaçons contre la côte NW de l'archipel. Une partie des glaçons déviés par l'archipel est évacuée au large de Cap-du-Dauphin où la concentration est très élevée. La côte SE, dans le sillage de l'archipel, est libre de glaçons.



PLANCHE 5.8.: Image prise par satellite le 9 mars 1974.
Un fort vent du SW de 25 mph comprime les glaces de dérive contre la face SW de l'archipel. Pour permettre l'évacuation des glaçons déviés, la concentration de glaçons au large de Cap-du-Dauphin est très élevée et la dérive doit être relativement rapide.

6.: CARACTERISTIQUES ET POUSSEES DES GLACES

Dans le but de déterminer les poussées que la glace exercera sur les installations portuaires projetées, nous ferons une brève analyse des caractéristiques et des propriétés mécaniques de la glace de mer susceptible de se rencontrer dans le voisinage des Iles-de-la-Madeleine.

6.1.: CARACTERISTIQUES

Sauf pour les premiers pouces, la structure cristallographique de la glace de mer se compose principalement de cristaux de glace dont l'axe optique a une orientation préférentielle horizontale. La texture de l'amorce de la couche de glace dépend des paramètres météorologiques et hydrodynamiques qui prévalent au moment de sa formation.

Par temps calmes et froids, il se forme dans la mince couche d'eau en surfusion à la surface, une pellicule de glace qui s'épaissit graduellement suivant les échanges thermiques entre l'atmosphère et l'eau.

Par temps venteux et froids, la couche d'eau en surfusion est plus importante et on assiste alors à la formation de frasil. Ces particules de glace s'agglomèrent les unes aux autres et forment ce que les navigateurs désignent sous le nom de "pancake ice".

La planche 6.1 montre deux exemples typiques de l'amorce initiale de champs de glace dans le Golfe du St-Laurent. Après environ 4 pouces sous la surface, la structure cristal-



1.: Champ de glace formé par temps froids et calmes.



2.: Champ de glace formé par temps froids et venteux.

lographique, dans l'un et l'autre cas, devient identique. La figure 6.1 montre, sous lumière polarisée, une section mince verticale et deux horizontales provenant de glace prélevée dans le Golfe du St-Laurent. On peut distinguer la texture colonnaire de la glace. Ce type de glace est le plus résistant de ceux susceptibles de se former dans le Golfe du St-Laurent.

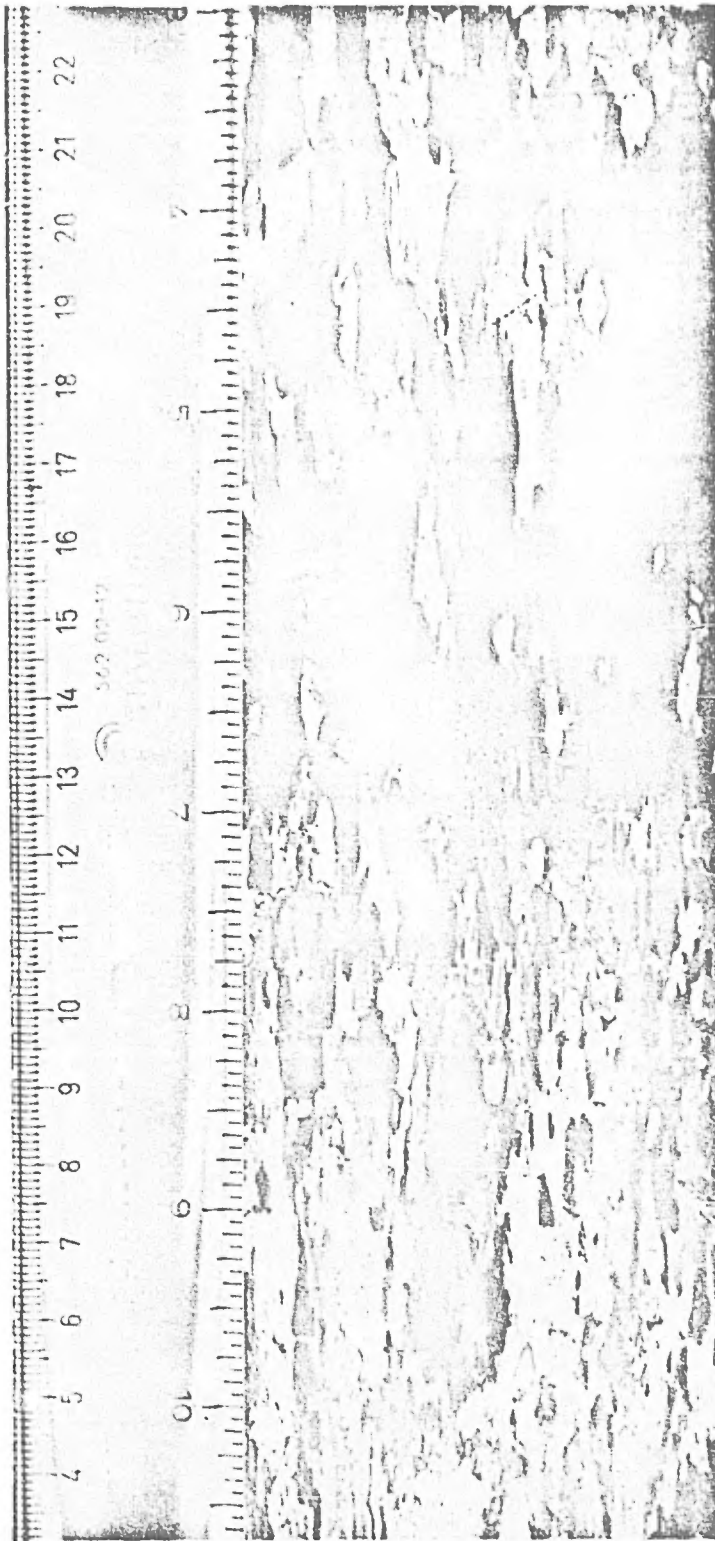
Lors de la congélation de l'eau de mer, les sels présents dans l'eau sont expulsés du réseau cristallin de la glace et une proportion d'environ 10 à 20% demeure emprisonnée aux interfaces des grains. Des mesures de salinité de la glace formée dans le Golfe du St-Laurent indiquent une concentration de sel dans la glace d'au moins 2 parties par 1,000 (en poids). (5)

Une foule de facteurs météorologiques et hydrodynamiques peuvent influencer l'épaisseur d'un champ de glace. Par exemple, une précipitation de neige influe sur la croissance d'un champ de glace non seulement par son intensité mais aussi par le moment où elle survient. Néanmoins, l'expérience montre une excellente corrélation entre l'épaisseur d'un champ de glace et la sommation des degrés-jours de gel accumulée depuis sa prise initiale. Cette relation est habituellement écrite sous la forme suivante: (6)

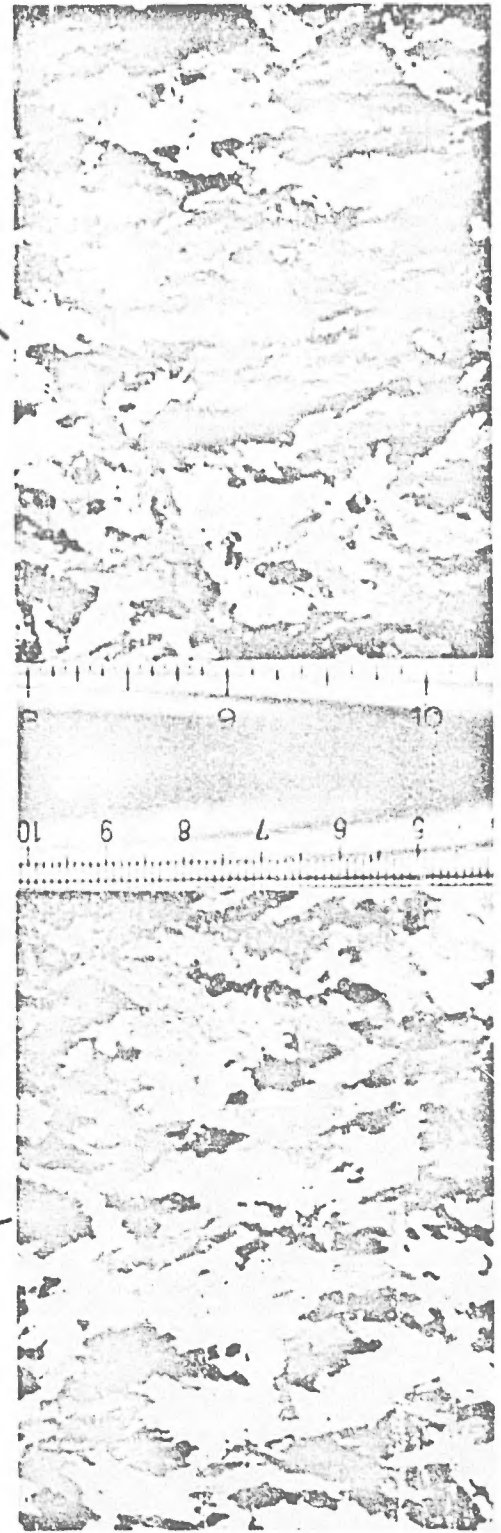
$$h = \alpha \sqrt{S} \quad (\text{pouces})$$

- où
- h = épaisseur du champ de glace exprimée en pouces;
 - α = coefficient pour tenir compte des conditions naturelles de transfert thermique;

GLACE DE MER



SECTION VERTICALE



SECTIONS HORIZONTALES

S = sommation des degrés ($^{\circ}F$)-jours de gel depuis la prise initiale du champ de glace.

Théoriquement, sous les conditions naturelles, α peut varier entre les valeurs limites 1 et 0.4. Cependant, les mesures montrent que α , sous les conditions naturelles, prend habituellement une valeur voisine de 0.6 et atteint parfois 0.8.

Aux Iles-de-la-Madeleine, la valeur moyenne de l'indice de gel est de 1,070 $^{\circ}F$ -jours de gel et la valeur centenaire se situe aux environs de 2,500 $^{\circ}F$ -jours de gel.

La glace formée dans le voisinage des Iles-de-la-Madeleine aura donc une épaisseur moyenne de 20 pouces et l'épaisseur maximale se situera habituellement de l'ordre de 26 pouces. L'épaisseur maximale centenaire est cependant de 40 pouces.

Toutefois, on retrouve régulièrement aux environs des Iles-de-la-Madeleine des glaçons formés dans la partie Nord-Ouest du Golfe et entraînés par les vents et les courants. L'indice de gel dans la région de Sept-Iles est de l'ordre de 2,500 $^{\circ}F$ -jours de gel. Il est donc sage, dans la conception d'ouvrages portuaires aux Iles-de-la-Madeleine, d'employer une valeur de 40 pouces comme épaisseur maximale.

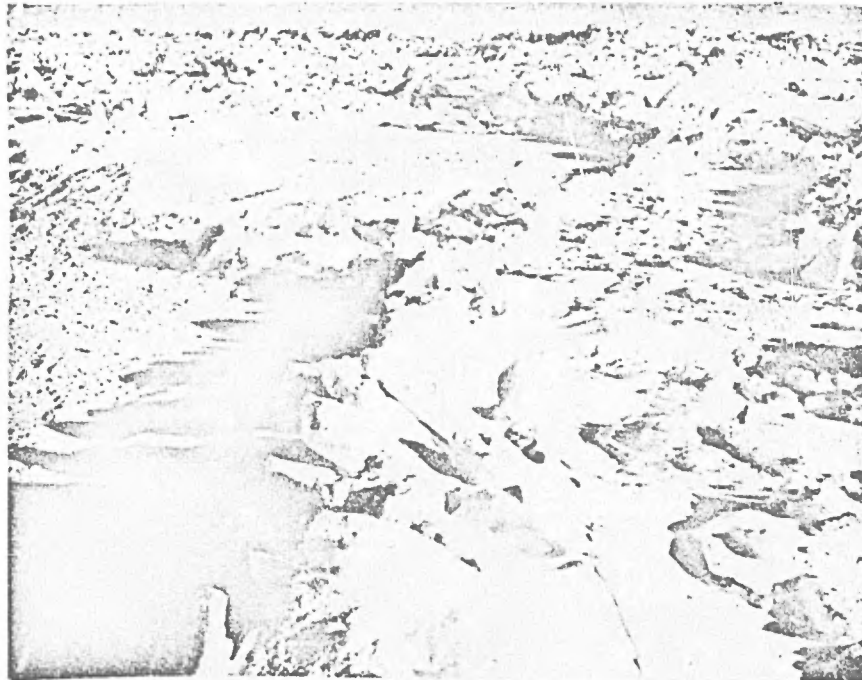
Il arrive parfois qu'en avril et mai, des fragments d'iceberg pénètrent dans le Golfe du St-Laurent par le Détroit de Belle-Isle. Les relevés du Ministère des Transports indiquent cependant qu'aucun iceberg ne s'est jusqu'à date rendu aux abords immédiats de l'archipel madelinot. La faible fréquence d'iceberg combinée à la faible probabilité qu'il vienne

heurter les installations portuaires projetées qui seront abritées partiellement par le Cap-du-Dauphin permet de conclure qu'il ne serait pas réaliste de concevoir les ouvrages en fonction des icebergs.

Dans le Golfe, on observe la formation de crêtes de pression (pressure ridges) lorsque des champs de glace s'entrechoquent ou se heurtent à des obstacles. Selon les observations de Whitman dans l'Arctique ⁽⁵⁾, la hauteur hors de l'eau des crêtes de pression se situe habituellement de l'ordre de 2 fois l'épaisseur du champ de glace. L'accumulation des glaçons sous la ligne d'eau atteint environ 10 fois l'épaisseur originale de la glace. Les glaçons en surface finissent par se souder les uns aux autres alors que la partie submergée demeure plus ou moins lâche. Ces crêtes de pression relativement nombreuses dans le Golfe forment les obstacles les plus redoutés des navigateurs. La planche 6.2 présente un exemple des crêtes de pression que l'on rencontre dans le Golfe du St-Laurent. Lorsque des crêtes de pression entrent en contact avec des structures maritimes, la poussée qu'elles exercent est limitée par la résistance du champ de glace qui les force contre l'obstacle. On est donc justifié de considérer comme charge de calcul la force suffisante pour broyer un champ de glace d'épaisseur maximale.

6.2.: PROPRIETES MECANIQUES

Les études effectuées sur la glace d'eau douce et la glace de mer montrent que leurs propriétés mécaniques sont très fortement influencées par les conditions d'expérimentation. Les principaux paramètres qui causent des variations importantes sont:



Crêtes de pression dans le Golfe du St-Laurent.

PLANCHE 6.2.

- a) Le type de glace: Dans le Golfe, la glace la plus résistante à une structure cristallographique colonnaire et l'orientation de l'axe optique de ses grains est horizontale.
- b) La température: A un abaissement de la température correspond une augmentation de la résistance de la glace. Comme la surface inférieure du champ de glace est au point de congélation et que sa surface supérieure ne dépassera pas -20°C , la résistance moyenne correspond donc à une température d'environ -10°C .
- c) Le taux de déformation: Sous de faibles taux de déformation, le comportement de la glace est ductile et sa contrainte de fluage augmente avec le taux de déformation. Cependant, sous des taux de déformation élevés, le comportement de la glace devient fragile et la contrainte de rupture est indépendante du taux de déformation. Lorsqu'un glaçon vient heurter un obstacle, le comportement de la glace est fragile et la force d'impact est indépendante de la vitesse d'approche.
- d) La salinité: La présence de saumure aux interfaces des grains de glace de mer en diminue la résistance. La quantité de sels occlus dépend du taux de croissance de la glace. Au voisinage des Iles-de-la-Madeleine, des mesures indiquent que la salinité de la glace sera d'au moins 2 parties par 1,000 (en poids).

- e) L'orientation de l'échantillon: La résistance de la glace dépend de la direction d'application de la charge par rapport à la direction des grains. Le rapport entre la résistance d'échantillons verticaux et la résistance d'échantillons horizontaux prélevés dans un champ de glace de mer est sensiblement égal à 3. La poussée maximale engendrée par un champ de glace correspond à sa résistance dans le plan horizontal.

Pour les fins de notre étude, nous avons besoin de connaître les propriétés de la glace de mer sous les conditions suivantes:

- a) type: colonnaire avec axe optique horizontal;
- b) température: -10°C ;
- c) taux de déformation: supérieur à la transition de ductile à fragile;
- d) salinité: 2 parties par 1,000 (en poids);
- e) orientation: charge appliquée normalement à l'axe des grains.

Le TABLEAU 6.1 reproduit les valeurs généralement admises dans la littérature pour la glace de mer sous les conditions précitées.

TABLEAU 6.1

PROPRIETES DE LA GLACE DE MER

Résistance en Compression	300 lbs/po ²	20 kg/cm ²
Résistance en Tension	135 lbs/po ²	9 kg/cm ²
Résistance en Flexion	135 lbs/po ²	9 kg/cm ²
Résistance en Cisaillement	150 lbs/po ²	10 kg/cm ²
Module élastique	450,000 lbs/po ²	30,000 kg/cm ²
Rapport de Poisson	1/3	1/3
Densité	0.9	0.9

6.3.: PUSSEES DE LA GLACE SUR LES OUVRAGES MARITIMES

Dans l'étude des poussées exercées par la glace sur les ouvrages maritimes, il importe de distinguer entre les forces qui peuvent s'exercer localement et les forces qui peuvent s'exercer sur l'ensemble de la structure. Toutes les parties des ouvrages exposés à l'action de la glace doivent pouvoir résister localement à la contrainte ultime de la glace. Cependant, il est impossible, à cause de la fragilité de la glace, que les contraintes appliquées atteignent simultanément la résistance ultime de la glace sur l'ensemble des parties exposées. Selon la forme de la structure, il y a des concentrations de contraintes où se produit la fracture avant que la contrainte appliquée en d'autres points n'atteigne la résistance ultime de la glace.

Pour les structures isolées dont la largeur ne dépasse

pas 20 fois l'épaisseur de la glace, la poussée maximale dépend des paramètres suivants:

- a) caractéristiques de la glace: épaisseur et résistance ultime;
- b) géométrie de la structure: largeur, forme et inclinaison;
- c) mode de fracture: rupture par compression ou par flexion;
- d) coefficient de friction entre la structure et la glace.

Une étude complète des forces exercées par la glace sur des structures isolées de différentes géométries a été faite par Carter ⁽⁷⁾. Les résultats analytiques indiquent que les formules empiriques d'usage courant conduisent habituellement à des valeurs trop élevées mais, par contre, sous certaines conditions, elles ne sont pas sécuritaires.

Dans le contexte de notre étude, ce sont surtout les forces exercées par la glace sur les structures longues, $L > 20 h$, qui nous intéressent principalement.

Les digues des installations portuaires projetées peuvent, pour les fins de l'étude, être assimilées à de longues structures verticales contre lesquelles viennent buter les glaces. Ce problème a précisément été étudié par Korzhavin ⁽⁸⁾ qui, par des considérations énergétiques, arrive à la conclusion que la poussée exercée par la glace sur un long ouvrage vertical ne peut dépasser: (page 195)

$$P = 50 h L \quad (\text{tonnes métriques})$$

- où P = poussée horizontale maximale exprimée en tonnes métriques;
 h = épaisseur de glace solide exprimée en mètres;
 L = longueur de l'ouvrage exprimée en mètres.

L'épaisseur maximale qu'on peut s'attendre de rencontrer aux abords des Iles-de-la-Madeleine se situe aux environs de 1 mètre (40 pouces). La charge de calcul exercée par la glace sur les ouvrages portuaires est donc de:

$$P/L = 50 \text{ (tonnes/mètre)}$$

ou bien exprimée en unités anglaises,

$$P/L = 33,500 \text{ (lbs/pi.lin.)}$$

où P est exprimé en livres et L en pieds.

Dans le calcul de stabilité des ouvrages, on devra donc considérer que la glace peut exercer une poussée de 33,500 lbs par pied de longueur de l'ouvrage. Cette force uniformément répartie s'applique à la hauteur du niveau d'eau.

7.: NAVIGATION HIVERNALE

Au cours des dernières années, la navigation hivernale dans le Golfe du St-Laurent a connu un essor incroyable. En effet, jusqu'aux années 1960, le Golfe du St-Laurent était considéré comme fermé à la navigation du 1er janvier au 1er mai. Cependant, durant la période 1960-1972, 9,920 passages de navires ont été enregistrés pendant les trois mois d'hiver. ⁽⁹⁾

Les renseignements compilés par le Ministère des Transports indiquent qu'au cours des trois derniers hivers, le tonnage transporté a augmenté quoique le nombre de passages de navires dans le Golfe a légèrement diminué: ⁽¹⁰⁾

Hiver 1974	-	663 passages
Hiver 1975	-	617 passages
Hiver 1976	-	530 passages

Les navires, au cours des mois d'hiver, suivent habituellement une course qui va de Cap Heath, l'extrémité Est de l'Ile d'Anticosti, et qui passe à quelques milles au large de Cap Roy, l'extrémité Sud-Ouest de la côte terre-neuvienne. Il passe, pendant les mois d'hiver, en moyenne 6 navires par jour. Les brise-glaces de la Garde Côtière patrouillent continuellement le secteur et prêle assistance aux navires en difficulté.

La route suivie par les navires dans le Golfe du St-Laurent passe à une cinquantaine de milles au Nord du port projeté de Leslie. Un navire de classe spéciale apte à naviguer dans les glaces pourrait donc assurer l'exportation du sel des Iles-de-la-Madeleine pendant les mois d'hiver. Il

doit cependant s'attendre à souffrir quelques retards et avoir recours à l'assistance de brise-glace en certaines occasions au cours des mois de février et mars. Le plan d'eau calme à l'intérieur du port sera, en général, couvert de glace du 15 janvier au 15 avril.

La côte Est de l'archipel, abritée par l'écran formé par les Iles, demeure libre de glace presque en permanence. Les manoeuvres d'approche, en hiver, seraient beaucoup moins difficiles et hasardeuses si le port projeté était situé du côté Est des Iles.

8.: CONCLUSION

Au large du site des installations portuaires projetées. d'importantes concentrations de glaces dérivent d'Ouest en Est de façon presque permanente entre le 29 janvier et le 9 avril. La technologie actuelle permet de construire des ouvrages qui peuvent résister aux poussées qu'exercera la glace.

Toutefois, si éventuellement il s'avérait souhaitable d'utiliser les installations portuaires à l'année longue, les manoeuvres d'approche seraient compliquées par la présence de fortes concentrations de glaces de dérive. La côte SE voit se prolonger sur plusieurs milles le sillage découpé par l'archipel dans les champs de glace. Strictement du point de vue des glaces, un port situé sur la côte SE n'aurait pas à subir l'action continue des glaces et faciliterait la navigation hivernale.

9. : REFERENCES

- (1) INRS-Océanologie, Université du Québec (1976) - "Courants littoraux à Cap-du-Dauphin", Rapport préliminaire préparé pour SOQUEM.
- (2) BRUUN, P.M. and JOHANNESSON, P. (1971) - "The Interaction Between Ice and Coastal Structures", Proceedings of the First International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, Trondheim, Norway, August 23-30, 1971.
- (3) CARTER, D. et DROUIN, M. (1972) - "Dynamique des glaces le long des rives du St-Laurent", Etude des Rives du St-Laurent, Ministère des travaux publics, Ottawa.
- (4) BRUUN, P.M. (1976) - "Feasibility Study for Harbor Facilities, Ileslie, Iles-de-la-Madeleine", Report prepared for SOQUEM, page 6.
- (5) Northumberland Consultants Ltd. (1968) - "Summary Report on Ice Studies", Government of Canada, Department of Public Works, December 1968.
- (6) CARTER, D. et DROUIN, M. (1972) - "Formation et croissance des champs de glace", Etude des Rives du St-Laurent, Ministère des travaux publics, Ottawa.
- (7) CARTER, D. (1976) - "Study of Ice Forces on Conical Light-piers and Other Marine Structures", Report prepared for Ministry of Transport by D. Carter, 1281 ave Bishop, Ste-Foy, Qué.
- (8) KORZHAVIN, K.N. (1962) - "Action of Ice on Engineering Structures", Publishing House of Siberian Branch of USSR Academy of Sciences (Draft translation 260, U.S. Army CRREL, Hanover).
- (9) Capt. POTTIE, J.D. (1972) - Ice Operations Officer, Sydney, Nova Scotia, Personal communication, Letter dated November 6, 1972.
- (10) Ministère des transports, Région des Laurentides, communication personnelle, juillet 1976.