

FO 5933

Environnement  
Canada

Environment  
Canada

# Le comportement du pétrole brut sous la glace

Environment Canada - Environnement Canada  
Scientifique (Canada, Direction Générale des Eaux Intérieures)

7 C3354

0026272J

C. Chen, B.E. Keevil et R.O. Ramseier

GB  
707  
C3354  
no. 61

ÉTUDE N° 61, SÉRIE SCIENTIFIQUE  
(Summary in English)

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES,  
DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU,  
OTTAWA, CANADA, 1979.

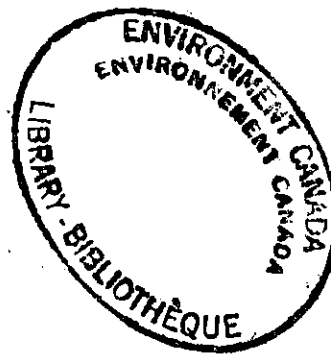


Environnement  
Canada

Environment  
Canada

# Le comportement du pétrole brut sous la glace

E.C. Chen, B.E. Keevil et R.O. Ramseier



**ÉTUDE N° 61, SÉRIE SCIENTIFIQUE**  
*(Summary in English)*

**DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES,  
DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU,  
OTTAWA, CANADA, 1979.**

# Table des matières

	Page
RÉSUMÉ .....	v
ABSTRACT .....	v
NOMENCLATURE .....	vii
INTRODUCTION .....	1
EXPÉRIENCES EFFECTUÉES .....	2
Matériel .....	2
Méthode .....	3
COMPORTEMENT DU PÉTROLE SOUS LA GLACE .....	4
Formation de gouttelettes .....	4
Émulsification .....	5
Dissolution .....	6
Étalement .....	6
Effet thermique .....	8
DÉVERSEMENTS DE PÉTROLE SIGNALÉS DANS LES COURS D'EAU CANADIENS ..	12
RÉSUMÉ .....	14
REMERCIEMENTS .....	14
RÉFÉRENCES .....	14
ANNEXE I. DÉTAILS DES CALCULS .....	17
ANNEXE II. VISCOSITÉ DES ÉMULSIONS D'EAU-DANS-LE-PÉTROLE (PÉTROLE BRUT DE NORMAN WELLS) .....	21
ANNEXE III. DONNÉES EXPÉRIMENTALES .....	25
ANNEXE IV. LISTE DES DÉVERSEMENTS DE PÉTROLE SIGNALÉS DANS LES COURS D'EAU CANADIENS .....	29

## Tableaux

1a. Propriétés du pétrole brut de Norman Wells .....	4
1b. Composants du pétrole brut de Norman Wells .....	4
2. Déversements accidentels de pétrole dans les cours d'eau canadiens, août 1972 à décembre 1974 .....	13

# Illustrations

Figure 1.	Représentation schématique du bassin circulaire . . . . .	2
Figure 2.	Système d'injection de pétrole . . . . .	2
Figure 3.	Représentation schématique du canal de recirculation d'eau . . . . .	3
Figure 4.	Goutte de pétrole à l'interface glace-eau . . . . .	5
Figure 5.	Log R en fonction de log t — résultats des essais . . . . .	7
Figure 6.	Chronophotographie du pétrole s'étalant sous la glace . . . . .	8
Figure 7.	Nappe de pétrole sous la glace . . . . .	8
Figure 8.	Pétrole sous la glace, sous l'effet d'un courant circulaire . . . . .	9
Figure 9.	Pétrole sous la glace, sous l'effet d'un écoulement unidirectionnel . . . . .	9
Figure 10.	Représentation schématique d'une couche de pétrole intercalée entre deux couches de glace . . . . .	10
Figure 11.	Température superficielle de la glace, $T_{iao}$ , en fonction de l'épaisseur de la lentille de pétrole, h . . . . .	10
Figure 12.	Profils de température — échantillon de calculs . . . . .	10
Figure 13.	Comparaison des profils des températures mesurées et calculées de la glace 7 jours après l'injection de pétrole . . . . .	11
Figure 14.	Déversements accidentels de pétrole dans les cours d'eau canadiens . . . . .	12

## Résumé

On a réalisé des expériences en chambre froide, à  $-15^{\circ}\text{C}$ , pour étudier le comportement du pétrole brut de Norman Wells déversé sous la glace formée à partir d'eau douce. Lorsque le pétrole se répand dans l'eau au-dessous de la glace, il se sépare en gouttelettes qui remontent à l'interface glace-eau pour former une couche de pétrole par coalescence de ces gouttelettes. L'étalement du pétrole sous la glace est complexe, en raison de la coalescence des gouttelettes de pétrole à l'interface glace-eau. Dans les eaux calmes, le rayon de la nappe de pétrole qui se forme sous la glace est approximativement proportionnel à la puissance 0.25 du temps écoulé. Dans les eaux troubles, cependant, les gouttelettes parcourent une certaine distance dans le sens d'écoulement de l'eau, avant d'atteindre l'interface. Quelques-unes d'entre elles se trouvent en suspension et sont dispersées dans la colonne d'eau. La nappe formée à l'interface glace-eau n'adhère pas à la glace et contient des émulsions «d'eau-dans-le-pétrole». Le pétrole qui se répand au-dessous d'une couche de glace dont l'épaisseur continue d'augmenter se trouve pris entre les couches de glace. Une lentille de pétrole intercalée entre des couches de glace se comporte comme un isolant et favorise l'abaissement de la température des couches de glace.

On a étudié et analysé le comportement du pétrole répandu accidentellement dans des cours d'eau canadiens. Les observations effectuées au sujet des déversements accidentels ont révélé que le pétrole répandu dans un cours d'eau se disperse rapidement en aval.

## Abstract

Experiments were carried out in a cold room at  $-15^{\circ}\text{C}$  to investigate the behaviour of Norman Wells crude oil spilled under freshwater ice. The oil, when released in water under ice, separates into droplets and rises to the ice-water interface where the oil drops coalesce to form a slick. The spreading of oil under ice is complicated by the coalescence of oil drops at the interface. In calm waters, the radius of the oil slick under ice is approximately proportional to 0.25 power of the elapsed time. In turbulent waters, however, the oil drops travel some distance, following the flow direction of water, before reaching the interface. Some of the small drops are suspended and dispersed in the water column. The slick formed at the ice-water interface does not adhere to the ice and contains some water-in-oil emulsions. If the oil is spilled under the ice and the ice continues to grow, the oil will be sandwiched between the ice layers. An oil lens trapped between the ice layers acts as an insulator and increases the temperature drop across the ice.

The behaviour of accidental oil spills in Canadian rivers was surveyed and analyzed. Observations of these accidental spills show that the oil, when spilled in a river, is quickly dispersed downstream.

## Nomenclature

A	—	superficie de la nappe de pétrole, en cm	$Q_{io}$	—	transfert de chaleur à travers la glace contenant une nappe de pétrole, en cal/cm <sup>2</sup> -hr
c	—	constante, sans dimensions	R	—	rayon de la nappe de pétrole, en cm
d	—	diamètre de la gouttelette, en cm	t	—	temps écoulé, en s
D	—	coefficient de diffusion, en cm <sup>2</sup> /s	$T_{ia}$	—	température à l'interface glace-air, en °C
$D_n$	—	diamètre de l'injecteur, en cm	$T_{iao}$	—	température à l'interface glace-air au-dessus de la nappe de pétrole, en °C
$F_b$	—	poussée, en dynes par cm <sup>3</sup>	$T_1$	—	température à la face supérieure de la nappe de pétrole, en °C
$F_p$	—	force de pression extérieure, en dynes/cm <sup>3</sup>	$T_2$	—	température à la face inférieure de la nappe de pétrole, en °C
$F_v$	—	force de viscosité, en dynes/cm <sup>3</sup>	u	—	vitesse d'étalement, en cm/s
g	—	accélération de la pesanteur, 980 cm/s <sup>2</sup>	$v_n$	—	vitesse d'injection, en cm/s
h	—	épaisseur de la nappe ou de la lentille de pétrole, en cm	$v_t$	—	vitesse finale de la goutte, en cm/s
k	—	coefficient de transfert de masse, g/(s)-(cm <sup>2</sup> )-(g/cm <sup>3</sup> )	V	—	volume de pétrole, en cm <sup>3</sup>
$K_i$	—	conductibilité thermique de la glace, en cal/s-cm-°C	$\delta$	—	épaisseur de la pellicule d'eau située au-dessous du pétrole et mise en mouvement par la force de viscosité, en cm
$K_o$	—	conductibilité thermique du pétrole, en cal/s-cm-°C	$\mu$	—	viscosité du pétrole, en poises
$L_1$	—	épaisseur de la couche de glace sus-jacente à la nappe de pétrole, en cm	$\mu_w$	—	viscosité de l'eau, en poises
$L_2$	—	épaisseur de la couche de glace sous-jacente à la nappe de pétrole, en cm	$\pi$	—	3.1416
$N_{Re}$	—	nombre de Reynolds, $(d v_t \rho_w) / \mu_w$ , sans dimensions	$\rho_d$	—	masse volumique de la phase dispersée, c'est-à-dire masse volumique du pétrole brut, en g/cm <sup>3</sup>
$N_{Sc}$	—	nombre de Schmidt, $\mu_w / (\rho_w D)$ , sans dimensions	$\rho_w$	—	masse volumique de l'eau, en g/cm <sup>3</sup>
$N_{Sh}$	—	nombre de Sherwood, $k / (d D)$ , sans dimensions	$\sigma$	—	tension interfaciale, en dynes/cm
Q	—	débit de pétrole, en cm <sup>3</sup> /s	$\tau$	—	contrainte de cisaillement, en dynes/cm <sup>2</sup>
$Q_i$	—	transfert de chaleur à travers la glace pure, en cal/cm <sup>2</sup> -hr			

# Le comportement du pétrole brut sous la glace

E.C. Chen, B.E. Keevil et R.O. Ramseier

## INTRODUCTION

La découverte de gisements de pétrole rentables dans le Nord du Canada entraînera probablement la construction d'oléoducs destinés à desservir les marchés du Sud. Ces oléoducs traverseront de nombreux fleuves, rivières et cours d'eau soumis chaque année à un gel saisonnier plus ou moins long. Le pétrole de ces oléoducs risque fort de se répandre accidentellement aux franchissements des rivières gelées en surface. Il pourrait s'agir de déversements importants, imputables par exemple à la rupture d'un oléoduc, ou peu importants, dus par exemple à des perforations dans un oléoduc. De plus, par suite d'accidents, le contenu des pétroliers, des réservoirs de stockage, ou des camions-citernes peut se répandre dans les cours d'eau.

Bien qu'on publie de plus en plus fréquemment les résultats des recherches sur la pollution par le pétrole, on ne dispose que d'une quantité limitée d'informations sur le comportement du pétrole déversé dans les cours d'eau gelés en surface. La seule étude systématique présentée dans la littérature scientifique est celle de Wolfe et Hoult (1), qui ont effectué des recherches relatives à l'action du gas-huile sur la face inférieure poreuse de la couche de glace de l'océan Arctique. Ils ont utilisé un dispositif composé d'un réservoir isolé en plexiglas, de 106 cm de haut, ayant une section carrée de 30,4 cm de côté, et recouvert d'une plaque carrée en acier inoxydable écroui. Les auteurs ont signalé que:

- 1) le pétrole injecté sous la glace s'accumulait en nappes au-dessous de cette dernière et, si l'englacement se poursuivait, la glace se formait alors au-dessous des nappes de pétrole;
- 2) le pétrole se comportait comme une couche isolante et bloquait le flux de chaleur;
- 3) le pétrole brut répandu au-dessous d'une couche de glace de mer d'une année peut former une nappe de 0,7 cm d'épaisseur en moyenne.

Dans les expériences réalisées sur le terrain, Glaeser et Vance (2) ont découvert que le pétrole brut provenant du

Versant Nord et rejeté au-dessous de la glace de mer formée depuis plusieurs années ne se dispersait pas, mais remontait à l'interface eau-glace et s'accumulait dans des trous. Dans un cas particulier, le pétrole déversé d'un fût de 55 gallons (ou 250 litres) et rejeté au-dessous d'une surface relativement plate s'est accumulé dans les nombreuses cavités de la glace; il n'y avait pas de courants dans cette zone et un jour après, le pétrole recouvrait une surface légèrement plus grande. On en a déduit qu'une éventuelle pression hydrostatique peut provoquer l'écoulement du pétrole brut sous une couche de glace de plusieurs années.

En parlant de l'évolution probable des déversements accidentels de pétrole dans le bassin de l'Arctique, Ramseier (3) a émis l'hypothèse que par un processus complexe de diffusion ou d'étalement sous la glace, le pétrole pouvait contaminer d'immenses surfaces en quelques années et il a aussi estimé que le déplacement du pétrole au-dessous de la glace serait d'environ 800 cm par jour dans la région du pôle Nord en raison des courants. De plus, le pétrole ne se dégraderait pas sous la glace.

Les observations sur les déversements accidentels de pétrole sous la glace ne sont guère plus nombreuses. Lorsque le pétrole a été répandu par l'ARROW dans la baie Chédabouctou (4), on a constaté la présence de gouttelettes de pétrole dans la tranche inférieure, de 5 cm, d'une couche de glace de 20 cm d'épaisseur; on peut en déduire qu'il se produit une migration du pétrole à travers la glace; tandis qu'à la baie Déception (5), on a noté qu'en plus de subir un déplacement vertical en même temps que la glace, du fait des marées, le pétrole était déplacé horizontalement par le mouvement des blocs de glace d'un lieu vers un autre.

Pour évaluer l'effet du rejet de pétrole dans les cours d'eau gelés en surface et mettre au point des techniques de nettoyage, on doit s'efforcer de mieux comprendre le comportement du pétrole répandu sous la glace. Le présent rapport est une étude du comportement du pétrole déversé au-dessous de la glace et de l'évolution de déversements accidentels survenus dans les cours d'eau canadiens.

## EXPÉRIENCES EFFECTUÉES

### Matériel

Un bassin circulaire en aluminium, de 70 cm de profondeur et de 150 cm de diamètre intérieur, a été installé dans une chambre froide où la température ambiante a été maintenue à  $-15^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  (figure 1). On a équipé cette chambre froide d'un ventilateur afin d'assurer un écoulement d'air et un flux de chaleur uniformes dans le bassin, et l'on a collé à la paroi extérieure du réservoir, des rubans chauffants qu'on a recouverts d'une couche isolante de polystyrène de 10 cm d'épaisseur. On a relié les rubans chauffants à des variacs ajustés à très faible puissance afin de compenser les pertes de chaleur au fond et sur les côtés. Cet ensemble constitué de rubans chauffants d'une couche isolante a permis de réaliser l'englacement du bassin dans une seule direction (englacement unidirectionnel) et de simuler effectivement une croissance de glace semblable à celle que l'on rencontre dans les lacs, les réservoirs et les cours d'eau à faible vitesse d'écoulement.

L'épaisseur de la glace a été mesurée à l'aide d'une jauge composée d'un petit cylindre d'acier placé sous la glace et suspendu à un fil (6). Pour effectuer la mesure, on amène le cylindre à l'interface eau-glace, on mesure la distance qui le sépare de l'interface glace-air et l'on soustrait cette distance de la longueur totale du fil.

Une jauge à thermistances a permis d'obtenir un profil des températures avec une précision de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Cette jauge contenait 19 thermistances de précision (YSI No. 44033) montées dans une tige de PVC à des intervalles de 1 cm dans la glace et de 5 cm dans l'air et l'eau. Tous les points de soudure des thermistances et tous les fils sont hydrofugés à la résine époxyde. Une fiche à plusieurs conducteurs est installée à l'extrémité de la jauge de manière à relier cette dernière au circuit en pont. Un commutateur rotatif permet de relier chaque thermistance au pont, de l'équilibrer et de mesurer la résistance.

Le pétrole répandu sous la glace est en général chaud initialement, parce que sa température est d'environ  $60^{\circ}\text{C}$  lorsqu'il pénètre dans la tête de puits, dans les citernes des pétroliers, ou qu'il circule dans les oléoducs. Cependant, on a injecté le pétrole brut à la température ambiante habituelle de  $20^{\circ}\text{C}$  parce qu'il est dangereux de chauffer le pétrole au laboratoire. Le dispositif d'injection du pétrole était composé d'un réservoir de plastique de 25 litres et d'une pompe à alimentation par gravité actionnée électriquement (figure 2). Ce dispositif portatif peut facilement être transporté dans la chambre froide et relié au tuyau d'injection du pétrole.

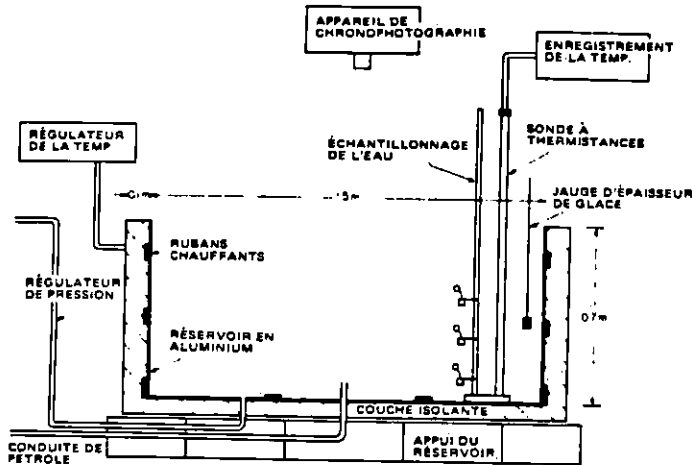


Figure 1. Représentation schématique du bassin circulaire.

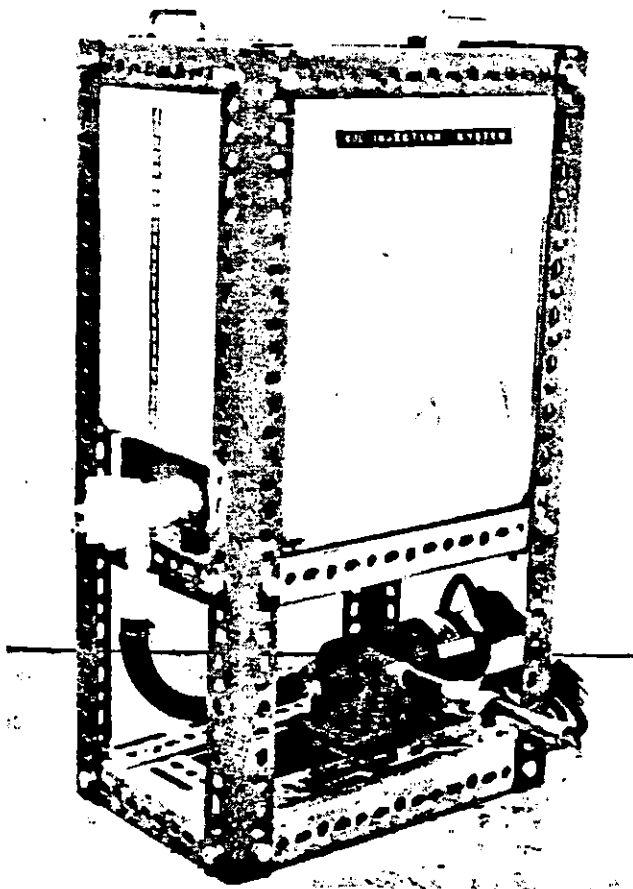


Figure 2. Système d'injection de pétrole.



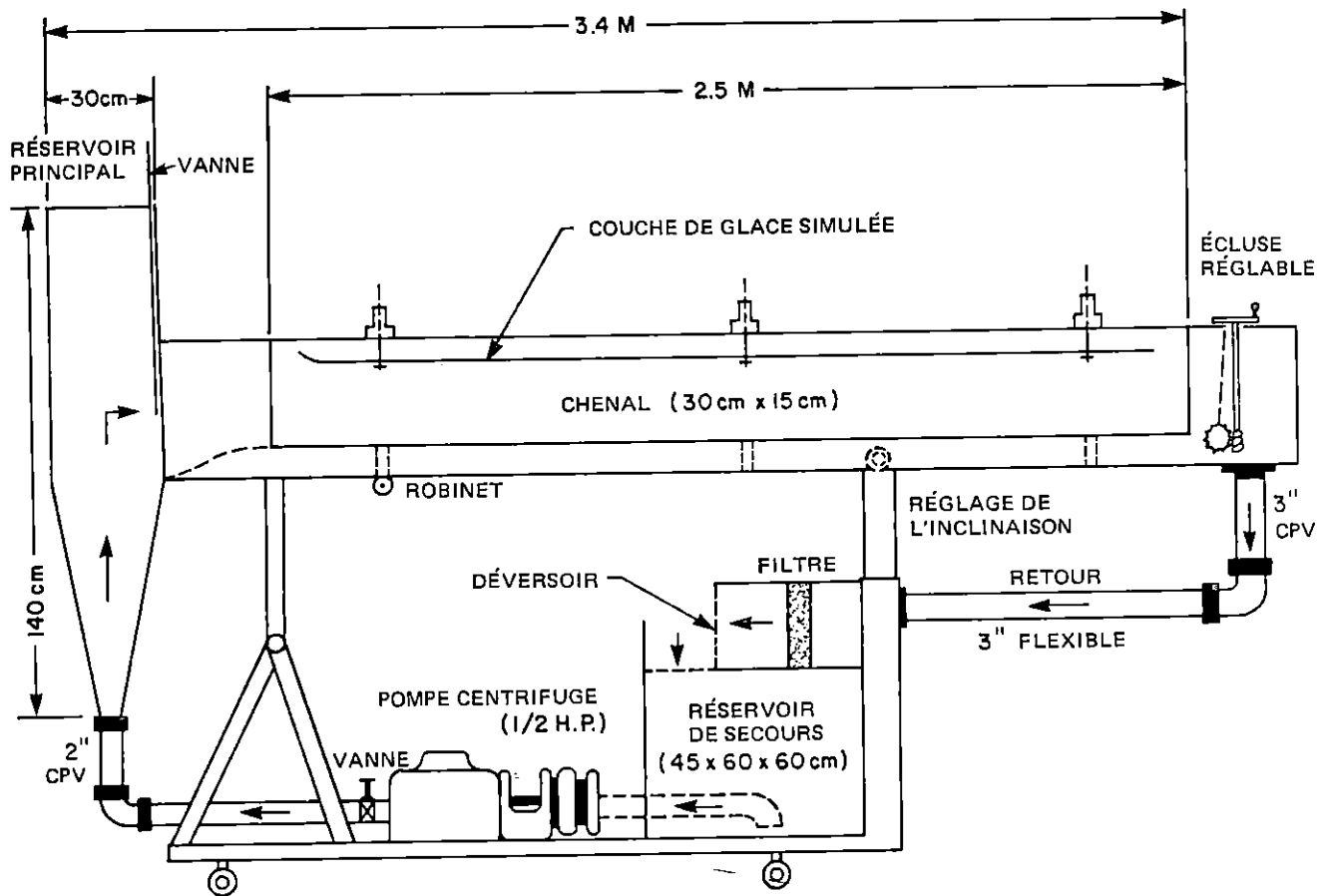


Figure 3. Représentation schématique du canal de recirculation d'eau.

### Méthode

La méthode d'essai adoptée est la suivante. On remplit le bassin d'eau jusqu'à une hauteur de 60 cm, à une température ambiante de  $-15^{\circ}\text{C}$ . Au bout de deux jours se forme dans le plan horizontal une mince couche de glace primaire. La couche secondaire se développe parallèlement au flux de chaleur, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface de l'eau jusqu'à atteindre l'épaisseur voulue, trois jours plus tard. On pompe le pétrole brut (5 litres à  $20^{\circ}\text{C}$ ) pendant environ 70 secondes à travers une conduite de 1.27 cm avant de le déverser à 30 cm au-dessous de l'interface glace-eau, au centre du bassin.

Afin d'effectuer certaines expériences dans les conditions d'un courant circulaire, on a monté latéralement un moteur électrique extérieur au bassin, et installé une estacade circulaire pour empêcher le pétrole de s'élever le long des parois du bassin et de s'étaler à la surface de la glace. On a mis le moteur en marche après que le bassin ait été rempli d'eau, et on l'a laissé fonctionner pendant

toute la durée de l'essai. On n'a pas pu obtenir de courbe détaillée des vitesses d'écoulement dans le bassin tout entier, mais à l'aide d'un petit moulinet hydrométrique, on a pu déterminer que la vitesse moyenne était d'environ 10 cm/s.

On a effectué quelques essais de simulation dans un canal recouvert de glace où l'eau s'écoulait dans une seule direction. Le canal servant à la remise en circulation de l'eau avait 250 cm de long, 15 cm de large et 30 cm de profondeur (figure 3). Un robinet-vanne réglait l'écoulement de l'eau provenant du dispositif de circulation d'eau dans le canal et la profondeur d'écoulement était réglée au moyen de la vanne d'aval. La vitesse moyenne du courant était de 15 cm/s dans le canal. Celui-ci était rempli d'eau à  $6^{\circ}\text{C}$  et la pompe assurait un écoulement d'eau continu. On a injecté 2 litres de pétrole brut à  $20^{\circ}\text{C}$  sous la couverture de plexiglas par un tuyau de 1.27 cm de diamètre.

On a utilisé du pétrole brut de Norman Wells pour cette recherche. Ses propriétés sont indiquées au tableau 1.

Tableau 1a. Propriétés du pétrole brut de Norman Wells

Point d'écoulement: -50°C	Couleur: vert foncé
Degré API à 15°C: 38.4	Densité à 15°C: 0.833
Tension superficielle à 24°C: 27.8 dynes/cm	Tension interfaciale (avec l'eau) à 24°C: 21 dynes/cm

Tableau 1b. Composants du pétrole brut de Norman Wells

Composants	% en volume
Essence légère	10.5
Essence et naphte, fraction totale	35.6
Pétrole lampant	5.7
Gas-oil	19.5
Distillat non visqueux	8.1
Distillat à viscosité moyenne	5.7
Distillat visqueux	2.9
Résidu	21.5
Pertes par distillation	1.0

## COMPORTEMENT DU PÉTROLE SOUS LA GLACE

### Formation de gouttelettes

Lorsqu'on injecte du pétrole brut sous de la glace, dans de l'eau, ce qui revient à disperser un liquide dans un autre liquide avec lequel il est immiscible, il se forme des gouttelettes de pétrole. La taille des gouttes est fonction des propriétés des deux liquides et de la géométrie de l'injecteur. En règle générale, la taille des gouttes est directement proportionnelle à la tension interfaciale, à la viscosité de la phase aqueuse et à l'ouverture de l'injecteur, mais inversement proportionnelle à la différence de densité entre les deux liquides; elle ne dépend pratiquement pas de la viscosité de la phase dispersée.

La formation des gouttelettes dépend aussi de la vitesse d'écoulement du pétrole. Lorsque l'écoulement est lent, des gouttes se forment individuellement à l'extrémité de l'injecteur et augmentent de taille jusqu'à ce que la poussée qu'elles subissent dans l'eau soit supérieure à la force de tension interfaciale et alors, la goutte se détache.

Si la vitesse d'écoulement augmente, il arrive un moment où il se forme un jet continu de liquide entre l'extrémité de l'injecteur et le point où la goutte se détache. Si la vitesse d'écoulement continue à augmenter, la longueur du jet s'accroît rapidement jusqu'à atteindre une valeur maximale; le jet prend alors une allure désordonnée à son extrémité extérieure et les gouttes formées deviennent moins uniformes. Si l'on continue à accroître la vitesse d'écoulement, la longueur du jet diminue, les gouttes prennent un aspect de plus en plus irrégulier, jusqu'à ce que le jet se brise et regagne l'extrémité de l'injecteur. Il en résulte un jet irrégulier composé de gouttelettes très fines.

On peut évaluer la taille des gouttes dans un système composé de deux liquides, par des méthodes éprouvées. Hayworth et Treybal (7) ont découvert que la taille des gouttes est uniforme et augmente proportionnellement à la vitesse d'expulsion des injecteurs, c'est-à-dire le débit divisé par la section de l'injecteur, jusqu'à une vitesse de 10 cm/s, puis diminue et devient moins uniforme entre 10 et 30 cm/s, enfin elle est très irrégulière et impossible à évaluer à une plus grande vitesse d'expulsion. On a pu, en considérant les forces agissant sur une goutte au cours de sa formation, déduire une équation semi-théorique et établir un graphique permettant de calculer le diamètre de cette gouttelette en fonction d'une vitesse ne dépassant pas 30 cm/s. Null et Johnson (8) ont mis au point une méthode permettant de calculer le diamètre de la gouttelette en fonction des débits compris dans la gamme

$$0 \leq (D_n v_n^2 \rho_d / \sigma)^{0.5} \leq 1.4$$

où  $D_n$  est le diamètre de l'injecteur,  $v_n$  la vitesse d'expulsion,  $\rho_d$  la densité de la phase dispersée, et  $\sigma$  la tension interfaciale. Si les propriétés physiques du système sont connues, elles se prêtent à la construction d'une série de graphiques qui permettent d'évaluer la taille des gouttelettes. Au cours de cette étude, on a injecté du pétrole brut à travers un tuyau de 1.27 cm (0.5 po) de diamètre, à 30 cm au-dessous de l'interface glace-eau suivant un débit de 70 ml/s. Les calculs de la vitesse d'expulsion,  $v_n$ , et de  $(D_n v_n^2 \rho_d / \sigma)^{0.5}$  ont donné 13.8 cm/s et 3.1 respectivement. Comme la masse volumique du pétrole brut de Norman Wells est de 0.83 g/cm<sup>3</sup> et la tension interfaciale d'environ 21 dynes/cm, le diamètre des gouttelettes est, d'après les calculs effectués suivant la méthode de Hayworth et Treybal, de 1.2 cm (voir l'annexe IA pour les calculs).

On a observé que le pétrole formait un jet de liquide d'environ 20 cm de long pendant qu'on l'injectait sous la glace et que ce jet se divisait en gouttes de 0.1 à 2 cm de diamètre, avant de remonter à l'interface glace-eau. On a toutefois constaté que la plupart des gouttes avaient environ

1 cm de diamètre, ce qui concordait assez bien avec la valeur calculée. Les petites gouttes ont été appelées gouttes secondaires, tandis que les gouttes plus grosses pourraient s'être formées par coalescence au cours de leur remontée à l'interface glace-eau. La figure 4 représente la photographie d'une goutte de pétrole de 1 cm de diamètre, immobile à l'interface glace-eau.

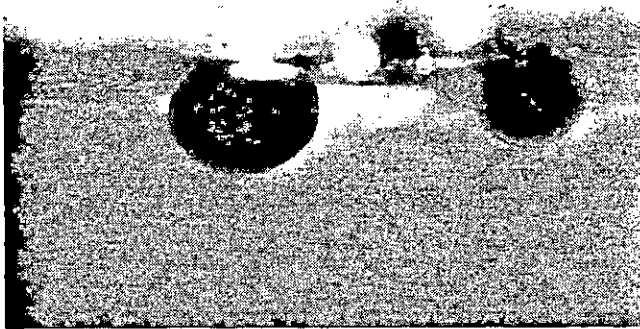


Figure 4. Goutte de pétrole à l'interface glace-eau.

### Émulsification

Si l'eau reste relativement immobile au-dessous de la glace, les gouttes de pétrole formées vont atteindre leur vitesse finale de remontée à l'interface glace-eau. Le comportement des gouttes dans un milieu liquide est beaucoup plus complexe que celui de sphères rigides, parce que les gouttes subissent des déformations, des oscillations et une circulation interne pendant la remontée. On sait que la circulation interne augmente la vitesse de remontée de la goutte, tandis que des oscillations qui provoquent l'aplatissement horizontal ou vertical des gouttes réduit leur vitesse de remontée; la déformation entraîne un accroissement d'aire superficielle d'où il résulte un plus fort coefficient de traînée, et partant, une plus faible vitesse de remontée.

Maintes corrélations permettent de calculer la vitesse finale de la goutte. Dans le système étudié, l'équation de Klee et Treybal (9) est utilisée et les vitesses finales de remontée calculées pour des gouttes de pétrole de 0,1, 1 et 2 cm de diamètre sont respectivement de 4, 21 et 35 cm/s (voir les calculs à l'annexe IB).

Si l'eau est suffisamment agitée, au lieu de remonter rapidement à l'interface glace-eau, les gouttes de pétrole peuvent se fragmenter davantage et se disperser dans la colonne d'eau; il se forme alors une émulsion de pétrole

dans l'eau. Cette émulsion peut après sa formation être stabilisée à l'aide de groupes hydrophiles, tels que  $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{OH}^-$ ,  $-\text{CHO}$ ,  $\text{OSO}_3^-$  et  $-\text{SO}_3\text{H}$ , que l'on trouve habituellement dans le pétrole brut à l'état naturel (10). Chen (11) a signalé que les émulsions de pétrole brut-dans-l'eau sont assez stables: les gouttelettes de l'émulsion qui ont moins de 4  $\mu\text{m}$  de diamètre sont stables pendant des semaines, tandis que les émulsions contenant de 10 à 100 p.p.m. de pétrole sont stables pendant des mois. Si les émulsions sont soumises à des cycles de gel et de dégel, des gouttelettes de pétrole se reforment par coalescence, par suite des effets mécaniques de la formation de la glace (12); l'émulsion disparaît partiellement.

Dans l'expérience où le pétrole circulait en dessous de la glace sous l'effet du courant, on a observé que des gouttes de pétrole de 0,1 à 0,5 cm de diamètre se sont dispersées dans la colonne d'eau. Des gouttelettes de cette taille ne sont toutefois pas considérées comme faisant partie d'une émulsion; elles constituent plutôt une suspension dans l'eau, imputable au courant circulaire qui les empêche de remonter librement à l'interface glace-eau. Au cours d'incidents réels, c'est-à-dire d'un déversement accidentel au-dessous de la glace arctique, les émulsions de pétrole-dans-l'eau vont sans doute se former, parce que le déplacement de la face inférieure rugueuse de la glace de pack par rapport aux eaux océaniques sous-jacentes engendre inévitablement un écoulement turbulent dans l'eau.

À mesure que les gouttes de pétrole remontent à l'interface glace-eau et se réunissent pour former une nappe, des émulsions d'eau-dans-le pétrole peuvent aussi se former. Les émulsions d'eau-dans-le pétrole sont formées de gouttelettes d'eau enveloppées dans une gaine de pétrole et rendues stables par la présence de diverses matières résineuses et asphaltiques qui existent à l'état naturel dans les pétroles bruts. Ce type d'émulsion est connu comme étant extrêmement stable et peut contenir jusqu'à 85 % d'eau (13,14). L'émulsion d'eau-dans-le pétrole ainsi formée présente des différences de propriétés, notamment de viscosité, par rapport au pétrole. La viscosité peut augmenter jusqu'à la puissance 3 de sa valeur initiale; elle est fonction de la teneur en eau et atteint un maximum (15). L'émulsion d'eau-dans-le pétrole formée à partir du pétrole brut utilisé dans nos expériences a une viscosité maximale dix fois supérieure à celle du pétrole initial, lorsque la proportion d'eau est de 55 % environ (voir annexe II).

Au cours des expériences réalisées en injectant du pétrole sous la glace dans un courant circulaire, on a observé que la couleur virait au brun chocolat, ce qui indiquait la formation d'une émulsion d'eau-dans-le pétrole. Des échantillons de pétrole pris un jour après l'injection de pétrole sous la glace contenaient 23 % d'eau. Ceci confirme

l'existence d'une émulsion d'eau-dans-le pétrole. Toutefois, on a découvert que des échantillons recueillis dans des eaux calmes un jour après le déversement contenaient seulement 700 p.p.m. d'eau, ce qui indiquait que des émulsions d'eau-dans-le pétrole ne se formaient pas lorsqu'il n'y avait pas de courant. La coalescence des gouttes de pétrole à l'interface glace-eau ne crée pas une turbulence suffisante pour la formation d'une émulsion.

La teneur en eau du pétrole brut a été déterminée par la méthode Karl Fischer en utilisant un titrimètre automatique Metrohm.

### Dissolution

Lorsque du pétrole brut entre en contact avec de l'eau, ses composants solubles dans l'eau commencent à former une solution avec l'eau et à se dissocier du pétrole. Lee et Craig (16) ont identifié ces composants solubles dans l'eau comme étant des hydrocarbures aromatiques à bas point d'ébullition, comme le benzène, le toluène, les m-, p-, o-xylènes, l'éthylbenzène, les m-, p-éthyltoluènes, les 1, 2, 4-triméthylbenzènes et les 1, 2, 3-triméthylbenzènes. La solubilité totale de ces composants dans l'eau variait entre 0.5 et 1.6 p.p.m. suivant les pétroles bruts. Bien que les hydrocarbures à faible poids moléculaire aient dans l'eau une solubilité limitée, celle-ci doit être considérée comme négligeable puisqu'on n'a pu les identifier dans les échantillons prélevés.

Le transfert de ces composants solubles dans l'eau peut avoir lieu pendant les périodes de formation des gouttes, de remontée libre des gouttes, de coalescence à l'interface et de séjour sous forme de nappe au-dessous de la glace. On pense que le transfert de masse se fait principalement pendant la remontée des gouttes à l'interface, parce que le temps de contact, ou la surface de contact sont très limités le reste du temps. Pour estimer la vitesse du transfert de masse, c'est-à-dire la vitesse de dissolution, on doit d'abord déterminer le coefficient de transfert de masse,  $k$ , de la surface de la goutte à la phase aqueuse. Généralement,  $k$  est lié aux propriétés physiques et d'écoulement du système par la relation:

$$N_{Sh} = f(N_{Re}, N_{Sc})$$

où  $N_{Sh}$ ,  $N_{Re}$ , et  $N_{Sc}$  sont respectivement le nombre de Sherwood, le nombre de Reynolds et le nombre de Schmidt. En prenant des gouttes de pétrole de 0.1 cm de diamètre ( $d = 0.1$  cm) dont la vitesse de remontée est de 4 cm/s et en appliquant la relation de Grassman (17), on a calculé que le nombre de Sherwood ( $N_{Sh} = k d/D$ ) était 318; le coefficient de diffusion ( $D$ ) des hydrocarbures solubles

dans l'eau à 0°C avait pour valeur  $0.5 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s (18). Le coefficient de transfert de masse a donc été évalué à

$$2.18 \times 10^{-3} \text{ g/(s) - (cm}^2\text{) - (g/cm}^3\text{)}$$

En admettant que le pétrole brut contienne 1 % de composés solubles dans l'eau, la vitesse de dissolution est alors

$$1.8 \times 10^{-5} \text{ g/s-cm}^2$$

Il faut 7.6 s pour dissoudre dans l'eau la moitié des constituants solubles de gouttes de pétrole de 0.1 cm de diamètre qui en contiennent 1 %, à condition que la concentration ne varie pas avec le temps (voir l'annexe IC pour tous les détails de calculs). Des gouttes plus petites ont une vitesse de dissolution plus grande. Ces valeurs sont fondées sur certaines hypothèses et ne sont absolument pas exactes. Toutefois, elles permettent de se représenter la vitesse de dissolution des composants solubles dans l'eau au cours de la remontée des gouttes à l'interface.

Outre la dissolution, d'autres processus de vieillissement, tels que l'évaporation, l'oxydation et la biodégradation semblent négligeables, puisque le pétrole brut est déversé sous la glace et que la température de l'eau est proche du point de congélation.

### Étalement

L'étalement du pétrole sous la glace, par analogie avec son étalement sur l'eau ou sur la glace, se fait suivant trois étapes: inertie due à la pesanteur, viscosité due à la pesanteur et viscosité due à la tension superficielle. Au cours de chacune de ces étapes, l'une des forces d'étalement est compensée par une force contraire. On devrait remplacer ici la pesanteur par la poussée. Cependant, lorsque l'étalement du pétrole sous la glace est uniforme, la phase de viscosité due à la poussée devrait être primordiale, parce que l'étalement imputable à la superficielle ne se produit probablement pas et que l'étalement par inertie due à la poussée, qui n'a lieu que pendant les premières secondes, échappe à l'observation.

D'après l'argument de Chen, Overall et Phillips (19), la force extérieure de pression,  $F_p$ , due à la poussée par unité de volume est

$$F_p = F_b = c \rho_w g h A/V = c \rho_w g \quad (1)$$

et la force de viscosité,  $F_v$ , par unité de volume est

$$F_v = \tau A/V = \mu (du/dh) (A/V) = \mu R/(t h^2) \\ = \pi \mu R^5/(t V^2) \quad (2)$$

où  $F_b$  = poussée par unité de volume  
 $c$  = constante  
 $\rho_w$  = masse volumique de l'eau  
 $g$  = accélération de la pesanteur  
 $A$  = superficie de la nappe de pétrole =  $\pi R^2$   
 $R$  = rayon de la nappe de pétrole  
 $V$  = volume de pétrole =  $h A$   
 $h$  = épaisseur de la nappe de pétrole  
 $\tau$  = cisaillement  
 $\mu$  = viscosité du pétrole  
 $u$  = vitesse d'étalement  
 $t$  = temps écoulé

Lorsque la poussée et la force de viscosité s'équilibrent, ces deux forces sont égales. Donc:

$$c \rho_w g = \pi \mu R^5 / (t V^2) \quad (3)$$

Comme le volume de pétrole,  $V$ , est égal à  $(Q t)$ ,  $Q$  étant le débit de déversement, l'équation (3) devient

$$t (Q t)^2 c \rho_w g = \pi \mu R^5 \quad (4)$$

Le rayon de la nappe de pétrole peut par conséquent s'exprimer en fonction du temps écoulé,  $t$ , comme suit

$$R = \left( \frac{c \rho_w g Q^2}{\pi \mu} \right)^{0.2} t^{0.6} \quad (5)$$

Lorsque les gouttes de pétrole s'élèvent dans l'eau et se réunissent à l'interface glace-eau, il peut exister une couche d'eau entre le pétrole et la glace. L'équation (5) n'est peut-être pas correcte puisque la force de viscosité, donc l'équation (2) s'applique à une couche de pétrole. Si cette force de viscosité s'applique à une couche d'eau, il s'ensuit comme le suggère Fay (20), que l'épaisseur de la pellicule d'eau mise en mouvement par la force de viscosité a pour grandeur

$$\delta = (\mu_w t / \rho_w)^{0.5} \quad (6)$$

où  $\mu_w$  est la viscosité de l'eau.

La force de viscosité est donc, par unité de volume

$$\begin{aligned} F_v &= \mu_w (R/t) / h (\mu_w t / \rho_w)^{0.5} \\ &= (\mu_w \rho_w)^{0.5} R / (t^{1.5} h) \\ &= (\pi \mu_w \rho_w)^{0.5} R^3 / (Q t^{2.5}) \end{aligned} \quad (7)$$

En égalant les équations (1) et (7), on obtient

$$c \rho_w g = \pi (\mu_w \rho_w)^{0.5} R^3 / (Q t^{2.5}) \quad (8)$$

Le rayon de la nappe de pétrole est:

$$R = \left( \frac{c \rho_w^{0.5} g Q}{\pi \mu_w^{0.5}} \right)^{0.3} t^{0.8} \quad (9)$$

Des expériences d'étalement du pétrole sous la glace en eau calme ont été effectuées pour déterminer laquelle, de l'équation (5) ou de l'équation (9), est applicable. Une grille de plastique et une horloge ont été placées sur la glace. Cinq litres de pétrole brut de Norman Wells ont été injectés sous une couche lisse de glace à raison de 70 ml/s et le mouvement d'étalement a été enregistré à l'aide d'un appareil photo. On a obtenu les vitesses d'étalement en étudiant les photographies prises à des intervalles réguliers, puis on a reporté les résultats sous forme graphique, ( $\log R$  en fonction de  $\log t$ ) comme indiqué à la figure 5. (Les données relatives à l'étalement sont présentées au tableau III-1). On a calculé que la pente était de 0.25, ce qui ne concorde ni avec l'équation (5) ni avec l'équation (9). On pouvait toutefois s'y attendre, puisque l'étalement du pétrole sous la glace est rendu plus complexe par la coalescence des gouttes de pétrole à l'interface glace-eau. En outre, le pétrole ne s'étale pas sous la glace comme sur l'eau ou sur la glace; en effet, il atteint l'interface glace-eau sous forme de gouttelettes de pétrole qui fusionnent pour former des gouttes plus grandes qui continuent à fusionner les unes avec les autres pour s'étaler en formant une nappe de pétrole; seules quelques-unes restent encore isolées. La figure 6 représente quatre photographies prises à intervalles réguliers de 5 secondes, tandis que la figure 7 montre une nappe de pétrole sous la glace trois heures après le rejet de pétrole.

Dans le cas de l'étalement de pétrole sous l'effet d'un courant circulaire, on a observé que le pétrole, une fois déversé, remontait à l'interface glace-eau et faisait le tour du bassin. (figure 8). Les gouttes de pétrole se brisaient, puis fusionnaient en raison du mouvement circulaire et n'adhéraient pas à la face inférieure lisse de la glace.

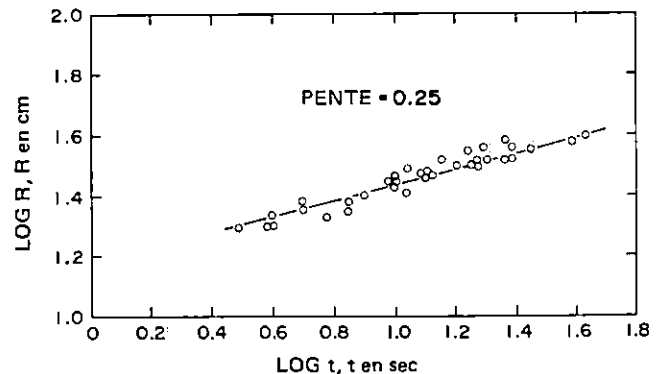


Figure 5. Log R en fonction de log t – résultats des essais.

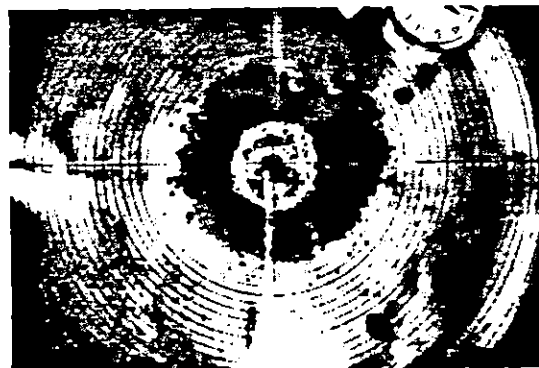
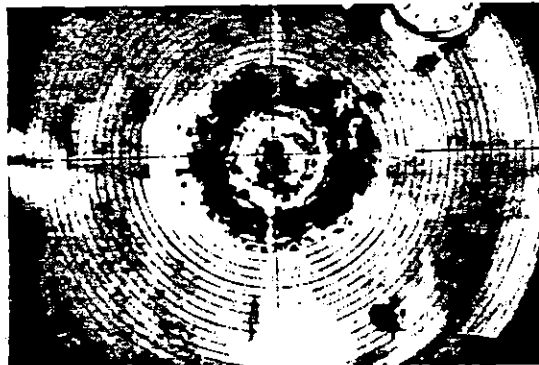
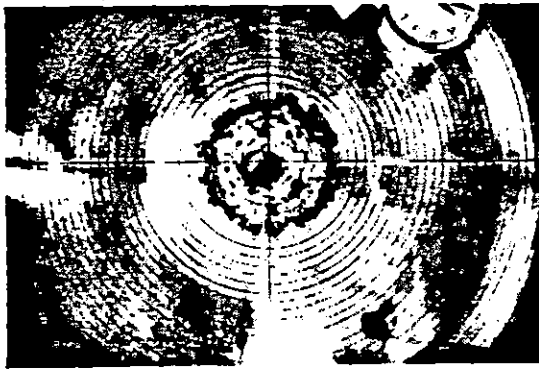
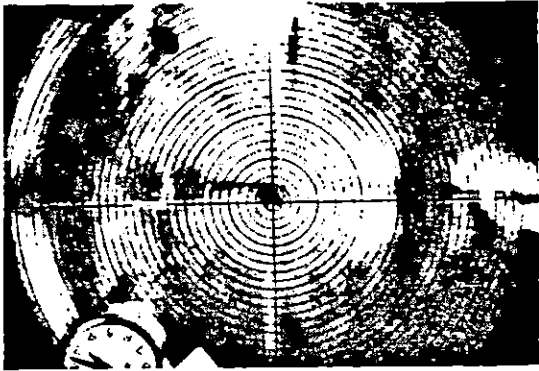


Figure 6. Chronophotographie du pétrole s'étalant sous la glace: a) 0 seconde après déversement; b) 5 secondes après déversement; c) 10 secondes après déversement; d) 15 secondes après déversement.



Figure 7. Nappe de pétrole sous la glace.

Pendant un autre essai effectué avec un courant circulaire, on a remarqué que la congélation de la bouillie de glace produisait une interface glace-eau très rugueuse et inégale. Dans la plupart des cas, on a constaté que le pétrole, après l'injection, s'accumulait dans des trous et cavités et se trouvait intercalé entre les couches de glace en formation (2 cm/jour), un jour plus tard.

Dans les essais utilisant le circuit d'aménée où l'eau s'écoulait dans une seule direction, on a constaté que le pétrole, une fois injecté, se décomposait en gouttelettes et remontait à l'interface glace-eau dans le sens de l'écoulement comme l'indique la figure 9. Le pétrole formait une couche variant entre 0.3 et 1 cm d'épaisseur.

#### *Effet thermique*

On sait qu'une surface de glace recouverte d'une couche noire de pétrole brut absorbe davantage le rayonnement solaire que la glace pure et fond par conséquent plus rapidement. Pourtant, le pétrole répandu au-dessous de la glace n'a probablement qu'un effet négligeable sur l'absorption du rayonnement solaire par la glace, puisqu'il se trouve à une grande profondeur au-dessous de la surface de glace. La plupart des radiations solaires ne peuvent traverser une grande épaisseur de glace et atteindre le pétrole. À notre connaissance, le rayonnement solaire ne peut traverser 10 cm de neige (21). De plus, la glace ne peut transmettre la chaleur et absorbe donc pratiquement tout le rayonnement infrarouge incident; les couches de glace très minces situées immédiatement au-dessous de la surface (22) l'interceptent presque totalement, et seulement 8 % du rayonnement solaire total peut traverser 30 cm de glace de rivière (23).

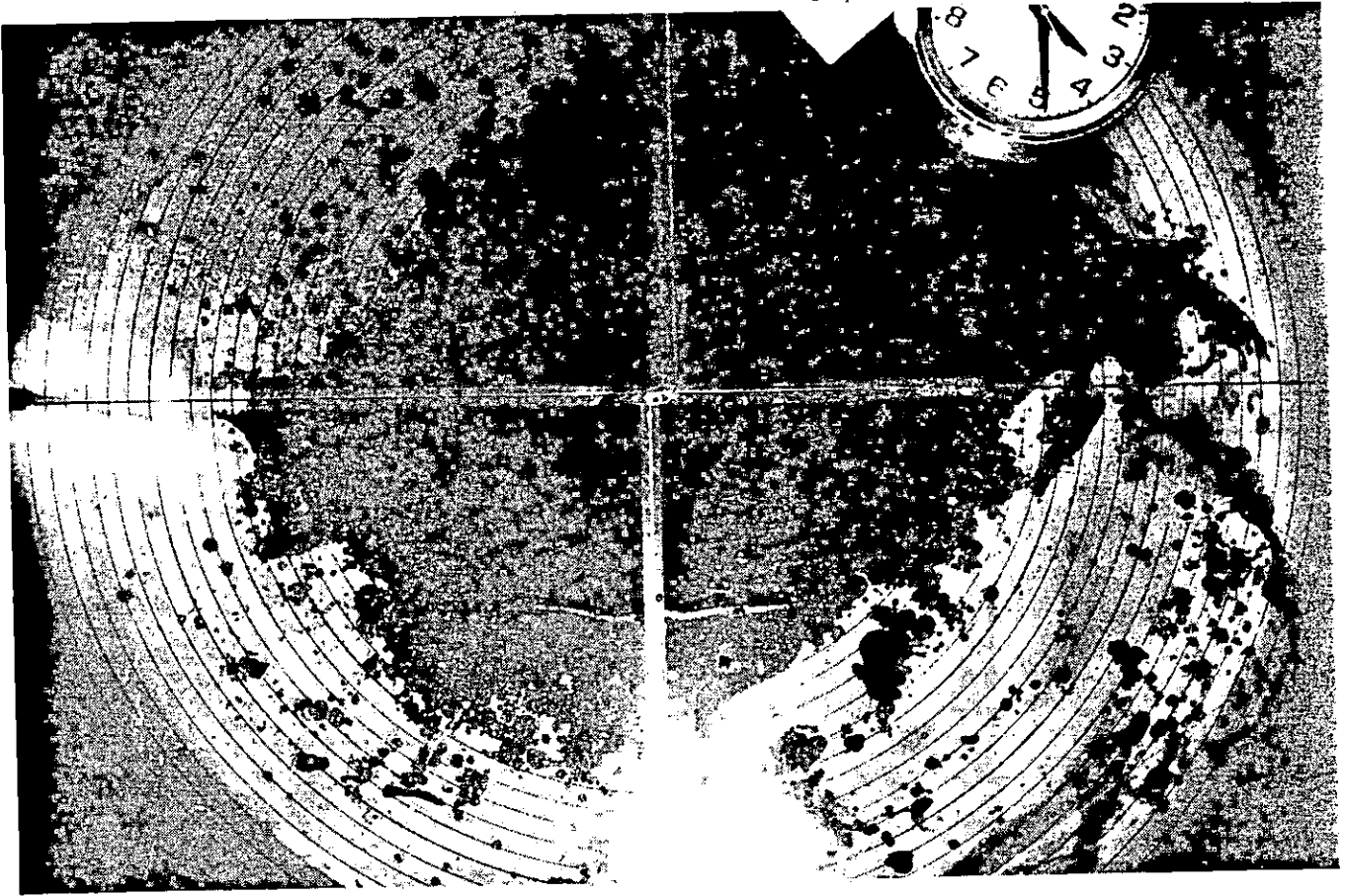


Figure 8. Pétrole sous la glace, sous l'effet d'un courant circulaire.

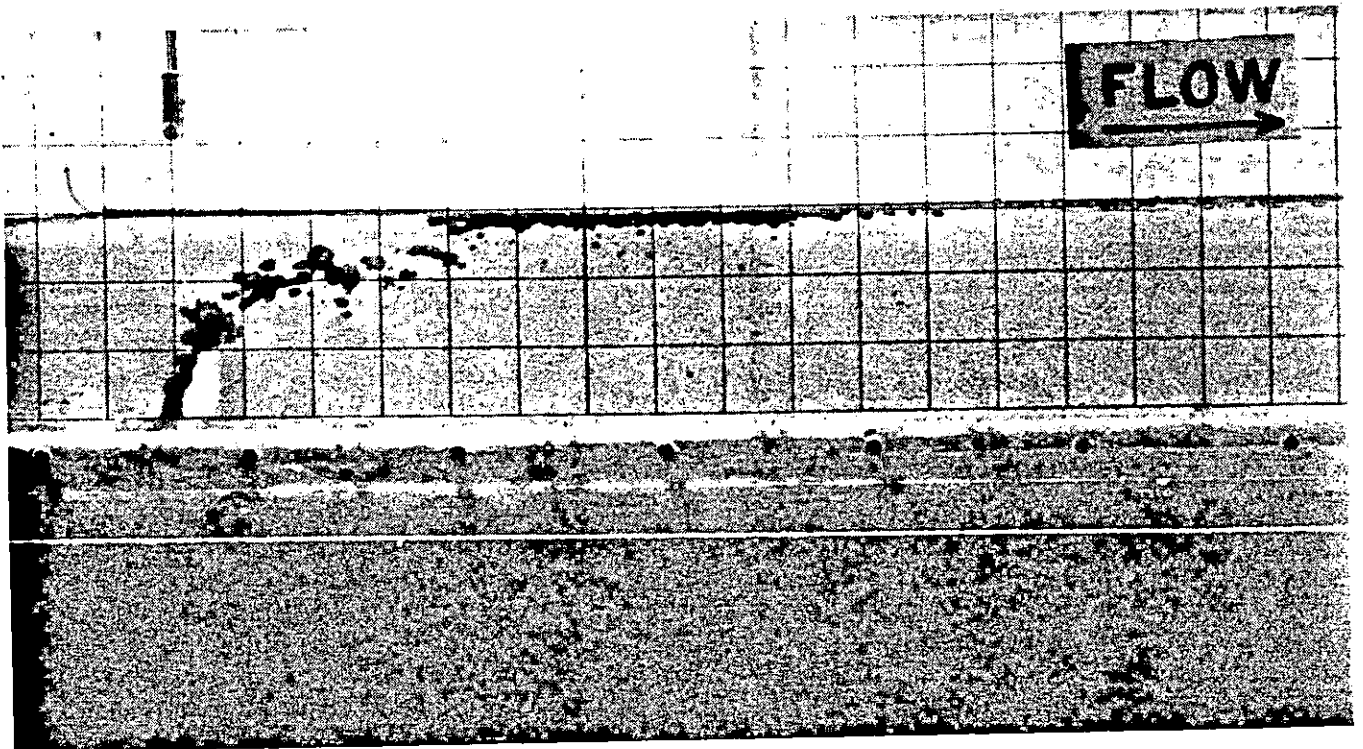


Figure 9. Pétrole sous la glace, sous l'effet d'un écoulement d'eau unidirectionnel.

Bien que le pétrole n'ait qu'une faible influence sur l'absorption du rayonnement solaire lorsqu'il se répand sous une épaisse couche de glace, il agit certainement sur le transfert de chaleur à travers la glace, parce que la conductibilité calorifique du pétrole brut (24) (0.0003 à 0.0004 cal/s-cm-°C à 0°C) est inférieure à celle de la glace (25) (0.005 cal/s-cm-°C à 0°C). L'exemple suivant illustre ces effets.

Si une mince couche de pétrole est intercalée entre les couches de glace, comme à la figure 10, la quantité de chaleur par unité de surface traversant la glace pure ( $Q_i$ )

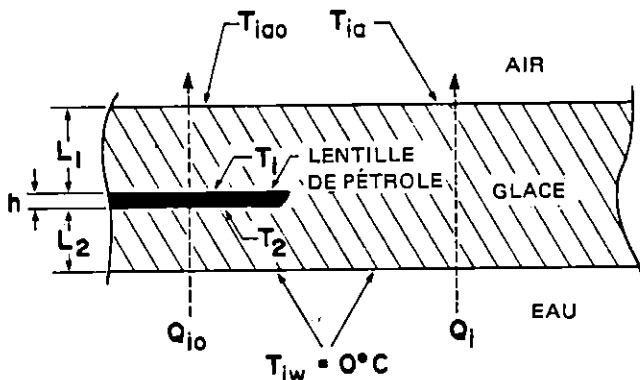


Figure 10. Représentation schématique d'une couche de pétrole intercalée entre deux couches de glace.

et celle qui traverse la glace contenant une mince couche de pétrole ( $Q_{io}$ ), auront pour valeurs respectives:

$$Q_i = \frac{K_i (T_{ia} - T_{iw})}{(L_1 + h + L_2)} \quad (10)$$

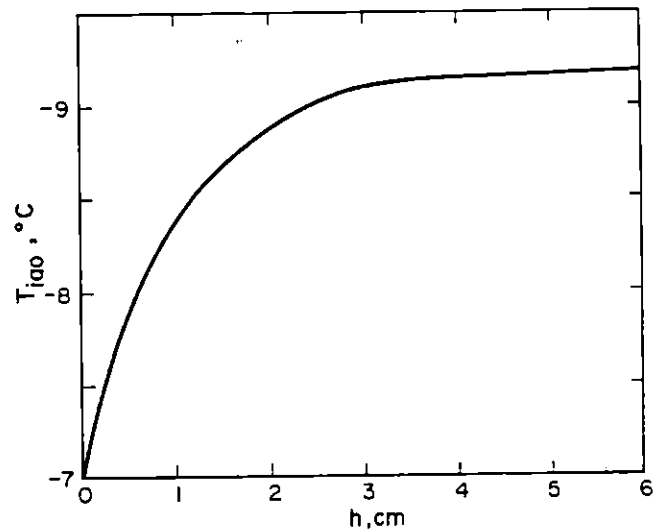


Figure 11. Température superficielle de la glace,  $T_{iao}$ , en fonction de l'épaisseur de la lentille de pétrole, h.

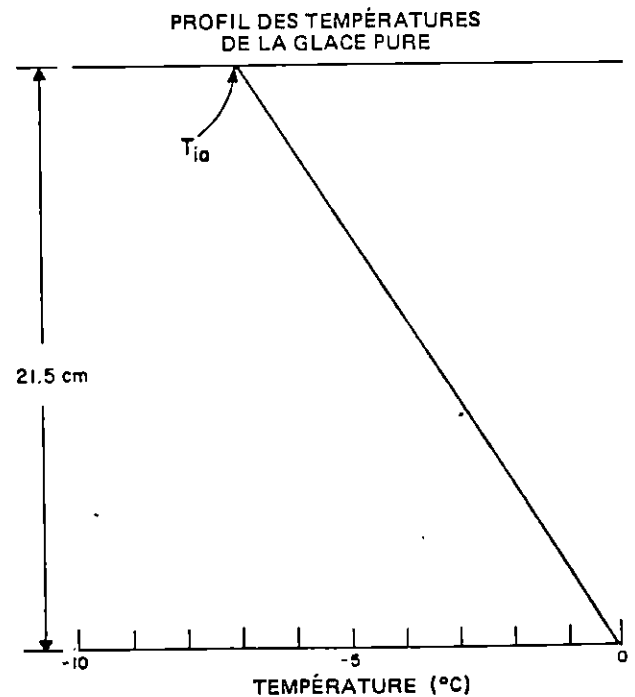
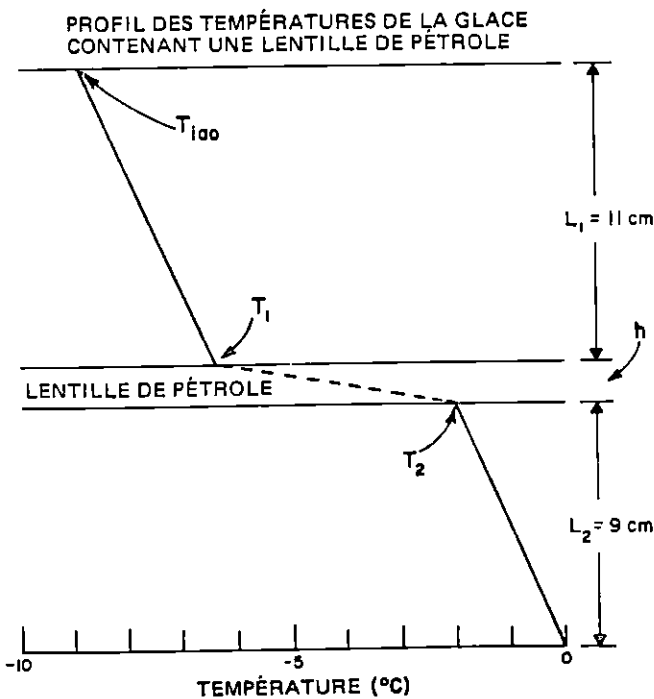


Figure 12. Profils de température – échantillon de calculs.



$$Q_{i0} = \frac{K_i (T_2 - T_{iw})}{L_2} = \frac{K_o (T_1 - T_2)}{h} = \frac{K_i (T_{iao} - T_1)}{L_1} \quad (11)$$

K étant la conductibilité calorifique de la glace et  $K_o$  celle du pétrole. La température de l'interface glace-eau,  $T_{iw}$ , est nécessairement  $0^\circ\text{C}$  tandis que la température de l'interface glace-air dépend de la température atmosphérique et de l'âge de la glace. Si l'on admet que la température de l'interface air-glace est uniforme, et a pour valeur  $-7^\circ\text{C}$ , ( $T_{ia} = T_{iao} = -7^\circ\text{C}$ ) et si  $h = 1.5 \text{ cm}$ ,  $L_1 = 11 \text{ cm}$  et  $L_2 = 9 \text{ cm}$ ,  $Q_i$  et  $Q_{i0}$  ont pour valeurs respectives  $5.86$  et  $3.04 \text{ cal/cm}^2\text{-hr}$ . Les accroissements d'épaisseur de la glace pure et de la glace comportant une lentille de pétrole ont été évalués à  $1.90$  et  $0.99 \text{ cm/jour}$  respectivement. Les températures au sommet et au fond de la couche de pétrole ont été de  $-5.14$  et  $-1.52^\circ\text{C}$  respectivement.

Étant donné que le pétrole brut est un meilleur isolant que la glace et que le transfert de chaleur se fait de l'eau vers l'air, la température devrait être plus basse à l'interface air-glace dans le cas de la glace contenant une lentille de pétrole que dans celui de la glace pure. Par conséquent, il n'est pas correct d'admettre que les températures  $T_{iao}$  et  $T_{ia}$  sont toutes deux égales à  $-7^\circ\text{C}$ . Toutefois, on peut évaluer  $T_{iao}$  par tâtonnement: la valeur obtenue en utilisant  $T_1 = -5.14^\circ\text{C}$  et la pente du profil de température de la glace pure (la figure 11 représente le tracé de  $T_{iao}$  en fonction de  $h$ ) est  $-8.7^\circ\text{C}$ . La valeur corrigée de  $Q_{i0}$  est de  $3.91 \text{ cal/cm}^2\text{-hr}$  et par conséquent, l'accroissement d'épaisseur de la glace est de  $1.27 \text{ cm/jour}$ . Les profils des températures calculées dans le cas de la glace contenant une lentille de pétrole et dans celui de la glace pure sont indiqués à la figure 12 (voir l'annexe ID pour les détails de calculs).

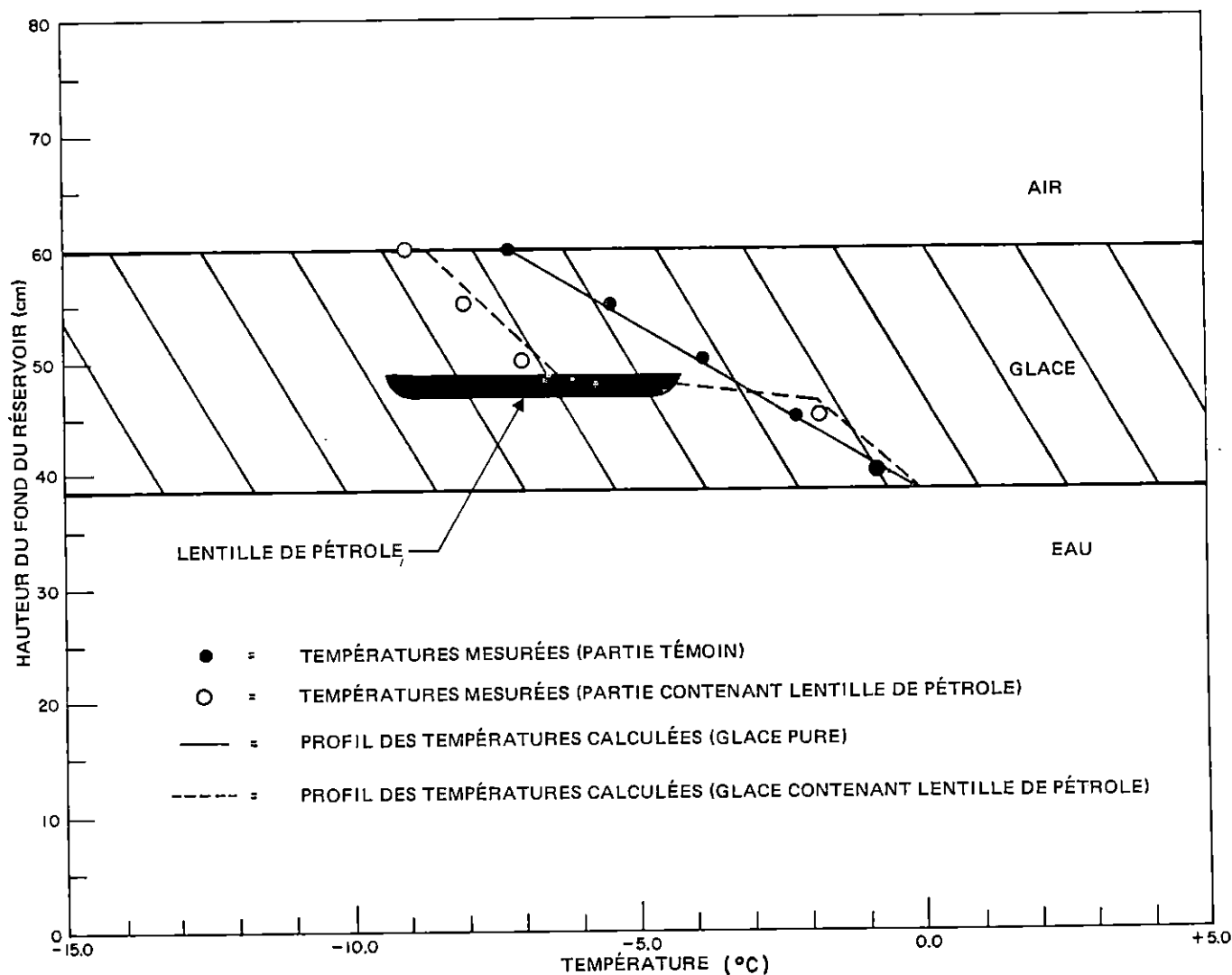


Figure 13. Comparaison des profils des températures mesurées et calculées de la glace 7 jours après l'injection de pétrole.

Pour étudier les effets thermiques dus à l'introduction d'une lentille de pétrole dans la glace, on a effectué des expériences dans un bassin circulaire divisé par du polystyrène en deux parties égales, une partie témoin et l'autre dans laquelle le pétrole injecté a formé une couche de 1.5 cm d'épaisseur au-dessous d'une couche de glace de 11 cm d'épaisseur. La croissance de la glace s'est poursuivie de manière continue et la couche de pétrole s'est trouvée intercalée entre deux couches de glace un jour après l'introduction du pétrole. La figure 13 donne les profils des températures mesurées et des températures calculées de la glace dans chacune des deux parties, 7 jours après l'introduction de pétrole (toutes les données expérimentales se trouvent à l'annexe III). On voit que les profils des températures mesurées concordent bien avec ceux des températures calculées. L'épaisseur de glace augmentait de 2 cm/jour environ, ce qui concordait avec la valeur théorique (1.90 cm/jour) obtenue pour la glace pure. Toutefois, les épaisseurs totales de glace ne différaient pas beaucoup d'une partie du bassin à l'autre, c'est-à-dire entre la glace pure et la glace contenant une lentille de pétrole, contrairement à ce que laissaient prévoir les calculs.

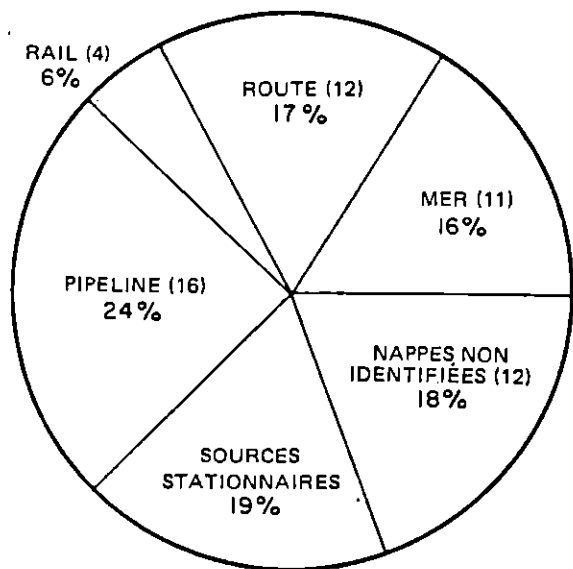
#### DÉVERSEMENTS DE PÉTROLE SIGNALÉS DANS LES COURS D'EAU CANADIENS

Afin de comprendre le comportement du pétrole déversé accidentellement dans les cours d'eau, on a réalisé

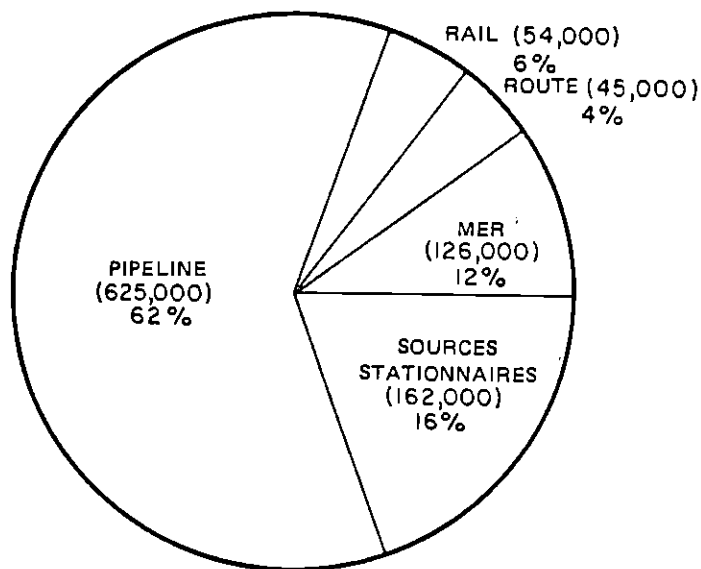
une étude des déversements survenus récemment dans les cours d'eau canadiens. Cette étude est résumée à l'annexe IV. Les renseignements obtenus provenaient de rapports sur les incidences environnementales préparés par le Centre national d'urgence antipollution du Service de la protection de l'environnement, du ministère de l'Environnement, à Ottawa (Ontario). Étant donné que certains incidents sont signalés par des observateurs profanes en la matière, les chiffres indiquant le nombre de gallons déversés pourraient bien être inexacts; toutefois, ces rapports constituent les seules sources de données récentes sur les déversements accidentels de pétrole au Canada.

D'août 1972 à décembre 1974, on a signalé 68 déversements de pétrole dans les cours d'eau canadiens ou à proximité de ces cours d'eau, et au total un million de gallons ont été répandus (4,546,000 litres). On n'a considéré que les cas où le pétrole s'est déversé directement dans les cours d'eau et les rivières, ou les déversements sur le sol suivis d'un écoulement vers les cours d'eau, à travers les fossés et égouts. On a espéré au début de l'étude qu'il serait possible de trouver de la documentation sur la progression d'un déversement de pétrole en aval d'un cours d'eau, ou des observations sur l'évolution du pétrole déversé. La plupart des rapports ne font cependant que mentionner le fait que le pétrole déversé se disperse rapidement, dans des eaux à écoulement rapide.

Les 68 cas de déversements accidentels sont subdivisés suivant les causes de déversement, de la manière suivante:



RÉPARTITION SUIVANT LA FRÉQUENCE (INCIDENTS)



RÉPARTITION PAR VOLUME (EN GALLONS)

Figure 14. Déversements accidentels de pétrole dans les cours d'eau canadiens.

(1) les déversements en mer provoqués par la collision ou l'échouage de pétroliers ou des transferts de pétrole; (2) les déversements accidentels sur les routes par des camions-citernes et au cours des transferts de pétrole; (3) les accidents ferroviaires; (4) les accidents touchant les oléoducs, en particulier les réseaux de collecte et de raccordement entre les installations de stockage; (5) les sources stationnaires; et (6) les flaques de pétrole non identifiées. Les déversements accidentels sont résumés à la figure 14 et au tableau 2. On ne peut se fier à une analyse de la fréquence des rejets de pétrole que si l'on considère en même temps le volume de pétrole déversé. Par exemple, d'après la figure 14, les oléoducs ne sont la source de 24 % des déversements, mais de 62 % du volume de pétrole déversé dans les cours d'eau. Ceci démontre donc que les oléoducs continuent à représenter la plus sérieuse source de pollution des cours d'eau par le pétrole.

Tableau 2. Déversements accidentels de pétrole dans les cours d'eau canadiens, août 1972 à décembre 1974

Genre	Nombre d'incidents	Incidents (%)	Gallons déversés	Gallons déversés (%)
En mer	11	16	126,000	12
Sur les routes	12	17	45,000	4
Sur les voies ferrées	4	6	54,000	6
Oléoducs	16	24	625,000	62
Sources stationnaires	13	19	162,000	16
Nappes de pétrole non identifiées	12	18	Inconnu	-
Total	68	100	1,012,000	100

On n'a signalé que sept déversements importants dépassant 20,000 gallons (90,920 litres); deux d'entre eux seulement sont survenus dans des cours d'eau gelés en surface. Le premier, qui eut lieu en mars 1974, provenait du tuyau des réservoirs de stockage d'une usine de traitement du poisson située au bord de la rivière Saint-Paul dans le comté de Duplessis, au Québec. Les réservoirs de stockage se trouvaient à environ 15 m au-dessus du niveau de la mer, à 30 m des berges du cours d'eau. Une seule conduite de 10 cm part des réservoirs pour aboutir à une décharge située près de la rivière. À environ 10 m de la rivière, l'oléoduc s'est affaissé entre deux appuis, sous le poids d'une couche de neige de 4 m d'épaisseur; le filetage

d'un raccord s'étant rompu, il s'est formé une ouverture d'environ 0.2 cm de large (26). Environ 27,000 gallons (122,742 litres) de pétrole se sont écoulés sur les berges et sous une couche de glace de 1.2 m d'épaisseur. On ignore la durée de ce déversement; on pense cependant qu'il a fallu plusieurs jours au réservoir pour se vider. Environ 35 jours après cette fuite, 6,600 gallons (30,003 litres) soit environ 25 % de tout le pétrole déversé, continuaient de s'écouler sous la glace et dans le réseau de fissures de la zone tidale. Les carottes de glace prélevées au large, à l'extérieur de la zone de fissures ne donnaient pas de pétrole libre en fondant, ce qui nous fait penser que les fissures s'opposent à l'écoulement du pétrole le long du fond de la couche de glace. La plus grande partie des 20,000 gallons restants a été entraînée en aval par les marées.

C'est en Alberta que s'est produit l'autre déversement, en décembre 1974, lorsqu'un oléoduc de 16 pouces (40.64 cm) passant sous la rivière House s'est rompu. Environ 200,000 gallons (909,200 litres) de pétrole synthétique se sont infiltrés dans le sol à partir d'une berge escarpée, à environ 300 m du cours d'eau. Le pétrole s'est écoulé en partie dans la glace de rivière, et en direction d'une surface d'eau libre à environ 3.5 mi (5.6 km) en aval. Il y avait de légères traces d'huile à 3.5 mi en aval, mais on n'en a pas trouvé dans les eaux libres situées à environ 5 mi (8 km) et 15 mi (24 km) en aval. Deux jours après le déversement on a réussi à brûler une nappe de pétrole sur une surface d'eau libre. On a disposé un barrage flottant constitué de grillage et de foin à 3.5 mi en aval. On a pu récupérer environ 25,000 gallons de pétrole (113,650 litres) dans une mare de décantation située en amont d'un barrage.

Le seul autre rejet de pétrole sur lequel on soit renseigné s'est produit en Suède (27) dans un cours d'eau gelé en surface. En février 1972 une quantité d'à peu près 250,000 gallons (1,136,500 litres) de gas-oil s'est répandue dans la rivière Ume, qui était gelée en surface. Le gas-oil s'est étalé sous la glace à l'interface glace-eau et s'est rassemblé dans les cavités de la face inférieure de la couche de glace. Habituellement, le gas-oil ne se trouvait pas intercalé dans les couches de glace. Lorsqu'il l'était, il avait une épaisseur d'environ 0.5 cm. Dans les phases initiales du rejet, la glace renfermait 100,000 gallons (454,600 litres), lesquels ne se sont d'ailleurs pas écoulés au-delà de 7 km en aval.

On peut tirer deux conclusions de cette étude des déversements de pétrole signalés dans les cours d'eau canadiens: (1) le pétrole déversé dans les rivières non gelées se disperse rapidement en aval; (2) le comportement du pétrole déversé dans les cours d'eau gelés en surface dépend surtout de l'état de la glace et de la vitesse du courant au moment du déversement.

## RÉSUMÉ

Lorsque le pétrole est libéré dans l'eau au-dessous de la glace, il se décompose en gouttelettes; les gouttes remontent à l'interface eau-glace pour fusionner et former une nappe de pétrole.

Dans les eaux calmes, les gouttes de pétrole remontent à la verticale et s'étalent à l'interface eau-glace. Le processus d'étalement est complexe. Le rayon de la nappe de pétrole est proportionnel à la puissance 0.25 du temps écoulé.

Dans les eaux turbulentes, les gouttes de pétrole remontent aussi à l'interface eau-glace. Elles parcourent cependant une certaine distance, suivant le sens d'écoulement de l'eau avant d'atteindre l'interface. Quelques-unes des petites gouttes sont suspendues et dispersées dans la colonne d'eau. La nappe formée à l'interface eau-glace n'adhère pas à la glace et contient des émulsions d'eau-dans-le-pétrole.

Lorsque le pétrole se répand sous la glace, elle se comporte comme une couche isolante, et augmente par conséquent le gradient de température en fonction de l'épaisseur de glace; la température superficielle de la glace sus-jacente à une nappe de pétrole est inférieure de quelques degrés à celle de la glace pure.

Si le pétrole se déverse sous forme de nappe sous la glace et s'il continue à se former de la glace, il va se trouver intercalé entre des couches de glace.

Il est difficile de prédire le comportement du pétrole répandu dans les cours d'eau gelés en surface. On a constaté que le pétrole rejeté accidentellement dans un cours d'eau se disperse rapidement en aval.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été entreprise avec l'appui du groupe d'étude "Environmental-Social Committee Northern Pipelines" sur l'exploitation des ressources pétrolières du Grand Nord. Nous remercions en particulier M. D.K. Mackay, chef de la Section de l'hydrologie arctique, Division de la glaciologie, Direction générale des eaux intérieures, du ministère de l'Environnement, à Ottawa, d'avoir assuré la coordination de ce projet.

Nous avons utilisé pour la présente étude les rapports sur les principales incidences environnementales, rédigés par le Centre national des interventions d'urgence du Service de protection de l'environnement, à Ottawa.

## RÉFÉRENCES

1. Wolfe, L.S. et D.P. Hout. 1974. Effects of Oil under Sea Ice. *J. Glaciol.*, vol. 13, p. 473.
2. Glaeser, J.L. et G.P. Vance. 1971. A Study of the Behaviour of Oil Spill in the Arctic. U.S. Coast Guard Report No. 714108/A/001.
3. Ramseier, R.O. 1973. Possible Fate of Oil in the Arctic Basin. Paper presented at the 1st World Congress on Water Resources, Chicago, Illinois.
4. Barber, F.G. 1970. Rapport du Groupe spécial de l'Opération Hydrocarbures (Nettoyage du mazout répandu dans la baie Chédabouctou), vol. III, p. 38-58. Information Canada.
5. Ramseier, R.O., G.S. Gantcheff et L. Colby. 1973. Oil Spill at Deception Bay, Hudson Strait. Scientific Series No. 29, Inland Waters Directorate, Department of the Environment, Ottawa, Ontario.
6. Ramseier, R.O. et R. Weaver. 1975. Floating Ice Thickness and Structure Determination. Technical Report No. 88, Inland Waters Directorate, Department of the Environment, Ottawa, Ontario.
7. Hayworth, C.B. et R.E. Treybal. 1950. Drop Formation in Two-Liquid Phase Systems. *Ind. Eng. Chem.*, vol. 42, p. 1174.
8. Null, H.R. et H.F. Johnson. 1958. Drop Formation in Liquid Liquid Systems from Single Nozzles. *A.I.Ch.E.J.*, vol. 4, p. 273.
9. Klee, A.J. et R.E. Treybal. 1956. Rate of Rise or Fall of Liquid Drops. *A.I.Ch.E.J.*, vol. 2, p. 444.
10. Pilpel, N. 1968. The Nature Fate of Oil on the Sea. *Endeavour*, vol. 27, p. 11.
11. Chen, E.C. 1974. Stability of Crude Oil-in-Water Emulsions. *J. Can. Pet. Technol.*, vol. 13, p. 38.
12. Chen, E.C. 1975. Influence of Freezing-Thawing on the Stability of Crude Oil-in-Water Emulsions. *J. Can. Pet. Technol.*, vol. 14, p. 38.
13. Berridge, S.A., R.A. Dean et R.G. Fallows. 1968. The Properties of Persistent Oils at Sea. *J. Inst. Petr.*, vol. 54, p. 300.
14. Thew, M.T. et A.G. Loriston-Clarke. 1968. Formation and Stability of Emulsion of Water in Crude Petroleum and Similar Stocks. *J. Inst. Petr.*, vol. 54, p. 333.
15. Hellmann, H. et F.J. Bruns. 1970. Experiments with Model on the Formation of Water-in-Oil Emulsions and their Significance for the Prevention of Oil Pollution at Sea. *Tenside*, vol. 7, p. 11.
16. Lee, C.C. et W.K. Craig. 1974. Water-Soluble Hydrocarbons from Crude Oil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol 12, p. 212.
17. Grassman, P. 1971. *Physical Principles of Chemical Engineering*. New York: Pergamon Press, pp. 590-592.
18. Sahores, J.J. et P.A. Witherspoon. 1970. Diffusion of Light

- Paraffin Hydrocarbons in Water from 2°C to 80°C. Adv. Org. Geochem., p. 219.
19. Chen, E.C., J.C.K. Overall et C.R. Phillips. 1974. Spreading of Crude Oil on an Ice Surface. Can. J. Chem. Eng., vol. 52, p. 71.
  20. Fay, J.A. 1969. "The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea", paru dans *Oil on the Sea*. New York: Plenum Press, pp. 53-63.
  21. O'Neill, A.D.J. et D.M. Gray. 1973. Solar Radiation Penetration through Snow. Symposia on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Septembre 1972, Banff, Alberta, vol. 1, pp. 227-241.
  22. Eckert, E.R.G. et R.M. Drake. 1959. Heat and Mass Transfer. 2<sup>e</sup> édition, New York: McGraw-Hill, p. 357.
  23. Munn, R.W. 1966. Descriptive Micrometeorology, New York: Academic Press, p. 134.
  24. U.S. Bureau of Standards. 1933. Thermal Properties of Petroleum Products. Miscellaneous Publication No. 97.
  25. Gold, L.W. 1967. Some Bulk Properties of Ice. Proceedings of Seminar on Ice, Sponsored by Dunlop Research Centre, Sheridan Park, Ontario.
  26. NORCOR. 1974. "Investigation of the Oil Spill at River St. Paul, Quebec, March 1974". Rapport interne.
  27. Jerbo, A. 1973. Two Types of Oil Spills in Swedish Inland Waters. Proceedings of Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, Washington, D.C., p. 599.

ANNEXE I

## **Détails des calculs**

Si la température de l'eau est de 1°C, il faut retirer une quantité de chaleur égale à 80.7 cal pour produire un gramme de glace.

Au-dessous de la glace pure, l'épaisseur de glace s'accroît à la vitesse de

$$\frac{Q_i}{80.7 \times \rho_i} \times 24 = 1.90 \text{ cm/jour}$$

dont  $\rho_i$  représente la masse volumique de la glace, soit 0.917 g/cm<sup>3</sup>.

On peut calculer le profil de la température dans le cas de la glace pure en utilisant l'équation suivante

$$-T_L = \frac{Q_i \times L}{K_i \times 3600} = \frac{5.86 L}{0.005 \times 3600}$$

L représentant la distance à l'interface glace-eau et  $T_L$  la température au point considéré. Les températures régnant à 5, 10, 15, et 20 cm de l'interface glace-eau ont été calculées et leurs valeurs respectives sont -1.63, -3.26, -4.88, et -6.51°C. Le profil de la température a une pente de -0.326°C/cm.

Si l'on admet que  $T_{iao} = T_{ia} = 7^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} Q_{io} &= \frac{K_i (T_{iw} - T_2) \times 3600}{L_2} \\ &= \frac{K_o (T_2 - T_1) \times 3600}{h} \\ &= \frac{K_i (T_1 - T_{iao}) \times 3600}{L_1} \end{aligned}$$

Donc

$$-T_2 = 9 Q_{io} / (0.005 \times 3600) \quad (a)$$

$$T_2 - T_1 = 1.5 Q_{io} / (0.00035 \times 3600) \quad (b)$$

$$T_1 + 7 = 11 Q_{io} / (0.005 \times 3600) \quad (c)$$

En résolvant les équations (a), (b), et (c) simultanément, on a

$$\begin{aligned} Q_{io} &= 3.04 \text{ cal/cm}^2 \text{ -h} \\ T_1 &= -5.14^\circ\text{C} \\ T_2 &= -1.52^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Mais étant donné que le pétrole est un meilleur isolant que la glace et que la chaleur effectue un mouvement ascendant,  $T_{iao}$  devrait être inférieure à  $T_{ia}$  et peut se calculer en admettant que  $T_1$  a pour valeur -5.14°C et en utilisant le gradient de température de la glace pure. Ce qui donne

$$(-5.14 - 11 \times 0.326) = -8.73^\circ\text{C}$$

On devrait récrire l'équation (c) sous la forme

$$T_1 + 8.73 = 11 Q_{io} / (0.005 \times 3600) \quad (d)$$

La résolution des équations (a), (b) et (d), donne

$$\begin{aligned} Q_{io} &= 3.91 \text{ cal/cm}^2 \text{ -h} \\ T_1 &= -6.33^\circ\text{C} \\ T_2 &= -1.96^\circ\text{C} \end{aligned}$$

On peut calculer le gradient de température dans de la glace contenant une nappe de pétrole en appliquant les deux équations suivantes.

Au-dessus de la nappe de pétrole

$$T_{L'} = T_1 - \frac{Q_{io} \times L'}{0.005 \times 3600}$$

où  $L'$  représente la distance à la face supérieure de la nappe de pétrole et  $T_{L'}$  représente la température au point considéré.

Au-dessous de la nappe de pétrole

$$T_L = \frac{3.91 \times (-L)}{0.005 \times 3600}$$

ANNEXE II

**Viscosité des émulsions d'eau-dans le-pétrole  
(pétrole brut de Norman Wells)**



## DÉTAILS DES CALCULS

### A) Taille des gouttelettes

$$\begin{aligned} D_n &= 1.27 \text{ cm} \\ Q &= 70 \text{ ml/s} \\ v_n &= Q/(\pi D_n^2/4) = 13.8 \text{ cm/s} \\ \rho_d &= 0.83 \text{ g/cm}^3 \\ \Delta\rho &= 0.17 \text{ g/cm}^3 \\ \sigma &= 21 \text{ dynes/cm} \\ \mu_w \text{ à } 0^\circ\text{C} &= 0.017 \text{ poises} \\ \rho_d v_n^2 / (\Delta\rho \times 30.48) &= 1.0 \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma D_n}{\Delta\rho \times 62.4 \times 30.48} + \frac{396 (D_n/30.48)^{1.12} (v_n/30.48)^{0.547} (\mu_w \times 100)^{0.279}}{(\Delta\rho \times 62.4)^{1.5}} = 0.29$$

En utilisant le diagramme de Hayworth et Treybal (7), on a trouvé que le diamètre des gouttelettes était

$$d = 0.038 \text{ pi} = 1.2 \text{ cm}$$

### B) Vitesse finale de la goutte

$$\begin{aligned} \rho_w &= 1.0 \text{ g/cm}^3 \\ \mu_w &= 0.017 \text{ poises} \\ \Delta\rho &= 0.17 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

En utilisant l'équation de Klee et Treybal (9) dans la zone où la vitesse finale augmente avec le diamètre de la goutte, on obtient

$$v_t = 38.3 \rho_w^{-0.45} (\Delta\rho)^{0.58} \mu_w^{-0.11} d^{0.70}$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } d=0.1 \text{ cm, } v_t &= 4 \text{ cm/s} \\ d=1.0 \text{ cm, } v_t &= 21 \text{ cm/s} \\ d=2.0 \text{ cm, } v_t &= 35 \text{ cm/s.} \end{aligned}$$

### C) Vitesse de dissolution au cours du mouvement ascendant des gouttes

$$\begin{aligned} d &= 0.1 \text{ cm} \\ v_t &= 4 \text{ cm/s} \\ \rho_d &= 0.83 \text{ g/cm}^3 \\ \rho_w &= 1 \text{ g/cm}^3 \\ \mu_w &= 0.017 \text{ poises} \\ D &= 0.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \\ N_{Re} &= d v_t \rho_w / \mu_w = 23.53 \\ N_{Sc} &= \mu_w / \rho_w D = 3.4 \times 10^3 \end{aligned}$$

En utilisant l'équation de Grassman (17)

$$\begin{aligned} N_{Sh} &= k d/D = 2.0 + 0.6 N_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} = 45.65 \\ k &= N_{Sh} D/d = 2.18 \times 10^{-3} \text{ g/s} - \text{cm}^2 - (\text{g/cm}^3) \end{aligned}$$

Si le pétrole brut contient 1 % de constituants solubles dans l'eau, la concentration de ces constituants dans l'eau est, en g/cm<sup>3</sup>:

$$\frac{1 \times \rho_d}{100} = 8.3 \times 10^{-3}$$

La vitesse du transfert de masse est par conséquent,

$$2.18 \times 10^{-3} \times 8.3 \times 10^{-3} = 1.81 \times 10^{-5} \text{ g/s-cm}^2$$

La masse d'une goutte de pétrole de 0.1 cm de diamètre est

$$\rho_d V = 0.83 \times 4.189 (d/2)^3 = 4.3 \times 10^{-4} \text{ g}$$

Dont 1 % de cette quantité représente  $4.3 \times 10^{-6}$  g et la surface de la goutte est

$$\pi d^2 = 3.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

Si l'on admet que leur concentration dans la goutte de pétrole n'a pas de variation temporelle, le temps nécessaire pour dissoudre la moitié des constituants solubles de cette goutte est:

$$\frac{4.3 \times 10^{-6}}{1.81 \times 10^{-5} \times 3.14 \times 10^{-2}} = 7.6 \text{ s}$$

### D) Transfert de chaleur et profils de température

$$\begin{aligned} L_1 &= 11 \text{ cm} & K_i &= 0.005 \text{ cal/s-cm-}^\circ\text{C} \\ L_2 &= 9 \text{ cm} & K_o &= 0.00035 \text{ cal/s-cm-}^\circ\text{C} \\ h &= 1.5 \text{ cm} \\ T_{iw} &= 0^\circ\text{C} \\ T_{ia} &= -7^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Le transfert de chaleur qui s'effectue à travers la glace pure a pour valeur

$$Q_i = \frac{K_i (T_{iw} - T_{ia}) \times 3600}{L_1 + h + L_2} = 5.86 \text{ cal/cm}^2 - \text{h}$$

La chaleur latente de fusion de la glace est de 79.7 cal/g.

## VISCOSITÉ DES ÉMULSIONS D'EAU-DANS-LE-PÉTROLE (PÉTROLE BRUT DE NORMAN WELLS)

Les émulsions d'eau-dans-le pétrole contenant diverses quantités d'eau ont été préparées en mélangeant du pétrole brut de Norman Wells avec la quantité d'eau requise, en utilisant un homogénéiseur Virtis 45 (à 10,000 tours par minute pendant 10 minutes). On a ensuite déterminé la viscosité des émulsions à l'aide d'un viscosimètre rotatif Rotovisko Haake. Étant donné que les émulsions ne sont pas des liquides newtoniens, leurs viscosités ne sont plus constantes par rapport à la vitesse de cisaillement, et l'on a donc utilisé la viscosité «apparente» pour une seule vitesse de rotation (avec un facteur de vitesse de 6). Les résultats sont indiqués à la figure B-1.

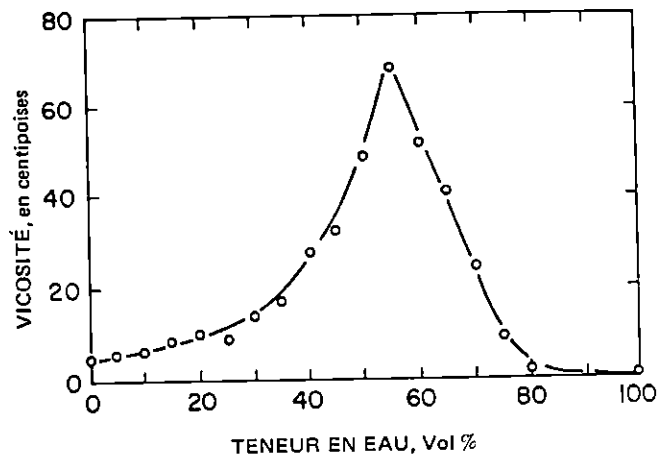


Figure B-1. Viscosité en fonction de la teneur en eau de l'émulsion.

ANNEXE III

## **Données expérimentales**

Tableau III-1. Données sur l'étalement du pétrole

	Temps écoulé t (s)	Log t	Rayon R de la nappe de pétrole (cm)	Log R
Essai 1	5	0.70	24	1.38
	10	1.00	28	1.45
	13	1.11	30	1.48
	18	1.26	32	1.51
	24	1.38	34	1.53
Essai 2	1	0	10	1.00
	4	0.60	20	1.30
	6	0.78	22	1.34
	11	1.04	26	1.41
	16	1.20	32	1.51
	20	1.30	34	1.53
	24	1.38	36	1.56
Essai 3	1	0	10	1.00
	7	0.85	24	1.38
	10	1.00	28	1.45
	13	1.11	30	1.48
	18	1.26	32	1.51
	23	1.36	34	1.53
	28	1.45	36	1.56
	38	1.58	38	1.58
	43	1.63	40	1.60
Essai 4	1	0	10	1.00
	2	0.30	16	1.20
	3	0.48	20	1.30
	4	0.60	22	1.34
	5	0.70	24	1.38
	7	0.85	28	1.45
	10	1.00	30	1.48
	11	1.04	32	1.51
	14	1.15	34	1.53
	17	1.23	36	1.56
	19	1.28	38	1.58
	23	1.36	40	1.60
	Essai 5	1	0	4
4		0.60	20	1.30
8		0.90	26	1.41
10		1.00	28	1.45
13		1.11	30	1.48
18		1.26	32	1.51

Tableau III-2. Profil des températures dans la glace (de 0 à 6 jours)

Hauteur dans le réservoir (cm)	Jour 0 témoin	Jour 0 lentille de pétrole	Jour 1 témoin	Jour 1 lentille de pétrole	Jour 2 témoin	Jour 2 lentille de pétrole	Jour 3 témoin	Jour 3 lentille de pétrole	Jour 4 témoin	Jour 4 lentille de pétrole
70	-11.8	-12.2	-11.8	-13.2	-13.4	-14.8	-13.8	-14.8	-10.6	-11.6
65	-11.2	-11.6	-11.4	-12.8	-12.8	-14.4	-13.2	-14.4	-10.2	-11.4
60	- 5.4	- 5.8	- 5.6	- 9.2	- 6.2	- 9.6	- 6.8	-11.2	- 5.8	- 7.8
55	- 3.0	- 3.2	- 3.4	- 7.8	- 4.0	- 8.2	- 4.8	- 8.6	- 4.4	- 6.8
50	- 0.6	- 0.6	- 1.2	- 6.4	- 1.8	- 6.8	- 2.8	- 6.0	- 3.0	- 5.8
45	0.0	0.0	+ 1.6	0.0	0.0	- 0.4	- 0.8	- 0.8	- 1.8	- 1.4
40	0.0	0.0	+ 1.8	+ 1.2	+ 0.6	+ 0.4	0.0	0.0	- 0.2	- 0.4
30	+ 0.2	+ 0.2	+ 2.0	+ 1.8	+ 1.0	+ 1.0	+ 0.4	+ 0.4	+ 0.2	+ 0.2
20	+ 0.4	0.4	+ 2.0	+ 2.0	+ 1.4	+ 1.4	+ 0.4	+ 0.4	+ 0.4	+ 0.4
10	+ 0.8	+ 0.8	+ 2.2	+ 2.2	+ 1.8	+ 1.8	+ 0.8	+ 0.8	+ 0.8	+ 0.8
			<i>Épaisseur de la glace (cm)</i>							
	11.0	-	12.5	-	14.0	-	16.0	16.0	20.0	20.0

Tableau III-3. Profil des températures dans la glace (de 7 à 13 jours)

Hauteur dans le réservoir (cm)	Jour 7 témoin	Jour 7 lentille de pétrole	Jour 8 témoin	Jour 8 lentille de pétrole	Jour 9 témoin	Jour 9 lentille de pétrole	Jour 12 témoin	Jour 12 lentille de pétrole	Jour 13 témoin	Jour 13 lentille de pétrole
70	-12.4	-12.4	-11.4	-12.2	-12.6	-12.4	-13.0	-13.8	-13.4	-13.2
65	-12.0	-12.4	-11.0	-12.0	-12.2	-12.4	-12.6	-13.4	-13.2	-13.0
60	- 7.2	- 9.0	- 6.6	- 8.6	- 7.4	- 9.8	- 8.6	-10.6	- 8.8	-13.0
55	- 5.4	- 8.0	- 5.2	- 7.6	- 6.2	- 8.8	- 7.2	- 9.6	- 7.4	- 9.8
50	- 3.8	- 7.0	- 3.8	- 6.6	- 4.6	- 7.6	- 5.8	- 8.6	- 6.0	- 8.6
45	- 2.2	- 1.8	- 2.4	- 1.8	- 3.0	- 2.6	- 4.4	- 3.8	- 4.6	- 4.0
40	- 0.8	- 0.8	- 1.0	- 1.0	- 1.6	- 1.4	- 2.8	- 2.6	- 3.2	- 2.8
30	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	0.0	0.0	0.0	- 0.2	0.0	- 0.6	- 0.4
20	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	+ 0.4	+ 0.4	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.2
			<i>Épaisseur de la glace (cm)</i>							
	22.0	21.5	23.0	23.0	25.0	25.0	30.0	30.0	32.0	32.0

ANNEXE IV

**Liste des déversements de pétrole signalés  
dans les cours d'eau canadiens**

Tableau IV-1. Liste des déversements accidentels de pétrole signalés dans les cours d'eau canadiens

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Fleuve St-Laurent, près de Brockville (Ontario)	3 août 1972	Navire des Grands lacs non identifié	Faible volume	Gas-oil	Environ 2 mi de rivage ont été légèrement recouverts, et le gas-oil s'est rassemblé sous l'effet des vents et courants en masses plus épaisses
Fleuve Mackenzie, Inuvik (T.N.-O.)	5 août 1972	Un chaland ravitaillant en gas-oil un réservoir de stockage est resté sans surveillance; le gas-oil s'est répandu	38,000	Gas-oil	Le comportement du pétrole n'a pas été signalé
Rivière-du-Loup (Québec)	22 août 1972	Fissuration d'un réservoir sous pression	20,000 à 30,000	Gas-oil	Le gas-oil échappé d'un réservoir sous pression fissuré, a rempli deux puits et s'est écoulé dans la Rivière-du-Loup à environ 3 mi en amont de l'embouchure du fleuve Saint-Laurent. Ce gas-oil s'est mélangé à l'eau d'une cascade en traversant cette dernière, avant de franchir deux estacades de grumes. Le gas-oil a aussi contaminé les réserves d'eau d'une usine de pâte à papier.
Black Creek, Toronto (Ontario)	17 sept. 1972	Un camionneur a négligé de fermer une pompe	7,000	Fuel oil	On a pu endiguer le gas-oil à l'aide de sacs de sable et en récupérer une partie.
Rivière Humber, Toronto (Ontario)	20 oct. 1972	Un camionneur a confondu un reniflard d'égout avec la manche de remplissage d'un réservoir			
Rivière Humber, Woodbridge (Ontario)	13 nov. 1972	Un camion-citerne est entré en collision.	1,000	Fuel oil	On n'a pas observé le comportement du pétrole déversé
Fleuve St-Laurent, Île Verte	22 nov. 1972	Rejet expérimental de pétrole	270	Brut du golfe Persique	Le pétrole a été émulsionné
La Tuque (Québec)	26 déc. 1972	Déraillement de 26 wagons de chemins de fer	10,000	Essence et Fuel de soute C	Cinq wagons-citernes contenant de l'essence et 14 contenant du fuel de soute C se sont renversés dans la vallée de la Petite Rivière Bostonnais. Les wagons d'essence ont pris feu et l'incendie s'est communiqué aux autres wagons-citernes. De l'essence et du fuel dont une partie avait pris feu se sont déversés dans la rivière Saint-Maurice et se sont répandus en aval dans un courant de 22 mi. Des mares de pétrole isolées se sont rassemblées en aval dans les baies et criques abritées.
Clarkson Harbour (Ontario)	17 janv. 1973	Rupture d'un oléoduc	1,000	Fuel de soute C	Le fuel s'est déversé dans un petit ruisseau qui se jette dans le lac Ontario.

Tableau IV-1. Suite

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Rivière Margaree, Cap Breton (Nouvelle-Écosse)	9 fév. 1973	Un camion-citerne a débordé	1,000	Combustible à usage domestique	Le pétrole s'est rapidement dilué dans un cours d'eau.
East Flamboro Township (Ontario)	19 fév. 1973	Rupture d'un oléoduc	Non signalé		Le pétrole s'est répandu dans un ruisseau et dans un marécage. Certaines zones du marécage étaient recouvertes de 3 po de pétrole pur au-dessus de l'eau de drainage.
Ste-Anne de Bellevue, Montréal (Québec)	mars 1973	Inconnue	Inconnu	Huile noire	Une épaisse couche d'huile noire a couvert une portion de littoral de $\frac{1}{4}$ de mille de long.
Rivière Kaministikwia, Thunder Bay (Ontario)	mars 1973	Inconnue	Inconnu	Fuel de soute C	En décembre on a observé de petites mares de pétrole dans la rivière aux endroits libres de glace. On pense que le pétrole a pu s'échapper d'une installation de ravitaillement à raison de 50 gal par semaine et s'infiltrer dans le sol. En mars, le ruissellement a augmenté en raison de l'adoucissement du temps, et une plus grande quantité supplémentaire de pétrole s'est trouvée capturée par le mur d'un quai. Lorsque la glace s'est brisée, le pétrole est remonté à la surface en y formant des flaques et a été endigué par un navire amarré dans ce bassin pendant l'hiver. Environ 25,000 gal de pétrole et d'eau ont pu être récupérés derrière ce bassin et 5,000 dans le cours d'eau.
Rivière Miramichi, Newcastle (Nouveau-Brunswick)	1 <sup>er</sup> mars 1973	Rupture d'un réservoir de fuel domestique	300	Huile de chauffe	Le réservoir de fuel domestique d'un magasin s'étant rompu, le pétrole s'est déversé dans une canalisation d'égout, puis dans la rivière Miramichi. La rivière était couverte d'au-moins 16 po de glace, et l'on n'a rien pu faire pour repérer, endiguer, ou enlever le fuel écoulé.
Fleuve Mackenzie (T.N.-O.)	avril 1973	Déversement de pétrole au cours du transport d'un réservoir sur un véhicule à chenilles.	800	Gas-oil	Le cours d'eau était recouvert de glace et l'on n'a pas observé le comportement du pétrole.
Rivière des Outaouais, Papineauville (Québec)	11 juin 1973	Collision entre un camion semi-remorque et un train de marchandises	34,000	Fuel de soute C	Le pétrole s'est déversé dans un petit cours d'eau, puis s'est écoulé dans la rivière des Outaouais. Un barrage construit dans le ruisseau 6 h après le déversement a retenu apparemment la plus grande partie du pétrole. Entre 7,000 et 34,000 gal se sont échappés dans la rivière des Outaouais.
Rivière Athabasca, Parc national de Jasper (Alberta)	24 juin 1973	Fendillement de 4 po de long dans un oléoduc de 24 po	20,000 à 30,000 (volume estimé)	Huile brute non sulfurée de densité 0.85	L'huile a pénétré dans la rivière Athabasca et a été aperçue à 30 mi en aval. L'agitation des eaux a émulsionné et dispersé le pétrole.



Tableau IV-1. Suite

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Confluent des rivières La Biche et Liard (Colombie-Britannique)	18 juin 1973	Un dépôt d'hydrocarbures a été détruit au cours d'une inondation	13,000	Gas-oil	On n'a pas observé le comportement du pétrole.
Ruisseau Horner, Brant Township (Ontario)	24 juil. 1973	Rupture d'un oléoduc par une excavatrice	20,000 (volume estimé)	Huile pour turbines	On a édifié des barrages sur le réseau principal de drainage, afin d'endiguer l'huile, et environ 9,000 gal de mélange d'huile et d'eau ont pu être récupérés.
Rivière Ste-Claire, en aval de Sarnia (Ontario)	3 août 1973	Inconnue	Inconnu	Inconnu	On a observé l'étalement d'une mince pellicule d'huile sur 10 mi en aval.
Rivière des Outaouais, East Aylmer (Ontario)	26 août 1973	Inconnue	Inconnu	Inconnu	Du cambouis a recouvert 300 verges de rivage.
Fleuve St-Laurent, Île des Soeurs (Québec)	6 sept. 1973	Inconnue	Faible volume	"Huile noire lourde"	Nappe d'huile de 600 pi sur 50 pi. Des reflets d'huile sont nettement visibles sur les algues.
Ruisseau Deep Valley (Alberta)	11 sept. 1973	Un réservoir de stockage a débordé, et le pétrole s'est échappé par une fissure de l'enceinte de retenue	8,400	Brut	Le pétrole a fini par gagner un affluent du ruisseau Deep Valley et a pu être endigué à environ 2,000 pi du point de déversement.
Fleuve Mackenzie, Fort Simpson (T.N.-O.)	11 oct. 1973	Des enfants jouant sur les quais ont ouvert les vannes des tuyaux	1,000 500	Huile pour turbines Essence d'aviation	Les carburants se sont rapidement dispersés en raison de la grande vitesse du cours d'eau.
Rivière Prairie-Est (Alberta)	18 oct. 1973	Un oléoduc de 8 po	52,000	Brut moyen de l'Alberta	Le pétrole s'est déversé sur terre avant de gagner la rivière Prairie-Est et puis la rivière Heart-Sud. Le pétrole a été retenu par des estacades flottantes posées sur la rivière Prairie-Est et par l'accumulation de grumes dans la rivière Heart-Sud. Environ 35,000 gal ont été récupérés par pompes d'écumage.
Fleuve St-Laurent, écluse St-Lambert (Québec)	6 nov. 1973	Trou dans le réservoir d'un bateau	932	Brut	La plus grande partie du pétrole a été endiguée et récupérée dans l'écluse, et deux petites masses de pétrole se sont échappées en aval et dispersées dans le courant.
Port de Montréal (Québec)	28 nov. 1973	Le réservoir d'un bateau a débordé au cours de son ravitaillement en combustible	400	N° 1500	Le pétrole a été dispersé par le courant.

Tableau IV-1. Suite

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Ruisseau Cooksville (Ontario)	15 janv. 1974	Un camion-citerne est entré en collision.	2,700	Fuel de soute	Le pétrole s'est écoulé dans le ruisseau par un égout d'eaux pluviales.
Rivière Matapédia, près de Millstream (Québec)	21 janv. 1974	Déraillement d'un train	6,000	Fuel domestique	Le fuel s'est déversé dans la rivière Matapédia.
Rivière des Hurons, Ste-Madeleine (Québec)	6 fév. 1974	Un camion-citerne est entré en collision	3,500	Fuel domestique	Le fuel s'est déversé dans la rivière des Hurons par un caniveau. L'équipe de nettoyage a dû briser la <i>glace</i> pour récupérer le pétrole dans la rivière à l'aide de pompes et de "Sorbent C."
Fleuve St-Laurent, près de Longue-Pointe (Québec)	24 fév. 1974	Inconnue	Inconnu	Inconnu	Quantité inconnue de pétrole retenue sous la <i>glace</i> .
Rivière Caribou (Yukon)	24 fév. 1974	Un camion-citerne s'est renversé à 60 pi de la rivière	5,000	Gas-oil	Le contenu entier du camion-citerne s'est déversé sur la berge de la rivière Caribou. Une partie du gas-oil brûlait encore 30 h plus tard. On n'a pas retrouvé de gas-oil dans la neige ni dans la glace de rivière.
Rivière St-Paul, comté de Duplessis (Québec)	16 mars 1974	Une conduite d'un réservoir de stockage s'est rompue	27,000	Gas-oil	Le gas-oil s'est écoulé le long des berges, et sous quatre pieds de glace dans la passage Champlain du fleuve St-Laurent. Environ 6,000 gal de gas-oil ont été retenus dans la glace à proximité des installations portuaires, mais la plus grande partie s'est échappée en aval au-dessous de la <i>glace</i> . Des trous creusés dans la glace ont montré que la glace contenait moins de 1 % de pétrole en volume.
Fleuve St-Laurent, La Tabatière (Québec)	20 mars 1974	Rupture probable de l'oléoduc d'un réservoir de stockage	14,000	Gas-oil	Un volume estimé à 2,500 gal s'est déversé dans le fleuve St-Laurent sous la <i>glace</i> .
Ruisseau Black, Toronto (Ontario)	24 mars 1974	Un camion-citerne est entré en collision	5,000	N° 4	Le pétrole s'est déversé dans le ruisseau Black qui a été pollué sur environ 2 mi.
Rivière John Scotsburn, comté de Pictou (Nouvelle-Écosse)	3 avr. 1974	Un réservoir de stockage a débordé	2,000 à 3,000	Fuel domestique	Une partie du fuel s'est écoulée dans une conduite, puis dans un ruisseau avant d'aboutir à la rivière John.
Fleuve St-Laurent, Natashquan (Québec)	5 avr. 1974	Rupture d'une conduite	4,000	Gas-oil	Environ 100 gal se sont mêlés à la <i>glace</i> de rivière.
Fleuve St-Laurent, Verchères (Québec)	5 avr. 1974	Inconnue	Inconnu	Inconnu	Le pétrole répandu n'a pu être recueilli à cause de la force du courant.

Tableau IV-1. Suite

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Fleuve St-Laurent, 6 mi en amont de Brockville (Ontario)	15 avr. 1974	Un navire s'est échoué	35,000	Brut de l'Ouest	Le pétrole s'est déversé dans le fleuve près du littoral. Deux nappes de pétrole de 15 pi de large ont été observées sur environ 4 mi en aval du navire. On a observé que le pétrole était brassé par le courant au-dessous de la surface de l'eau avant de remonter à la surface. Un peu de pétrole a été rejeté sur les plages.
Rivière Sackville, Sackville (Nouvelle-Écosse)	15 avr. 1974	Fissure dans un tuyau	500	Fuel domestique	Le fuel a gagné un marécage par une tranchée temporaire de drainage, puis s'est répandu dans la petite rivière Sackville.
Champ pétrolifère de Swan Hill (Alberta)	2 mai 1974	Un petit glissement de terrain a rompu une conduite de trois pouces entre la tête de puits et les réservoirs de stockage	17,500 à 21,000	Brut de l'Alberta	Le pétrole qui s'est déversé sur terre a pénétré dans le ruisseau Edith situé dans le voisinage, et bien que l'on se soit efforcé d'endiguer le pétrole, une partie s'est échappée dans la rivière Swan. Un jour plus tard, des reflets de pétrole ont été observés à la surface de la rivière à 20 mi en aval. Le pétrole a été rapidement émulsionné dans le courant rapide.
Rivière Nelson, Norway House (Manitoba)	5 mai 1974	Continuation du déversement de novembre 1973	Inconnu	Inconnu	On a observé une nappe de pétrole au-dessous de la glace dans la rivière Nelson, ainsi que du pétrole dans les trous d'eau potable.
Fleuve St-Laurent, Montréal (Québec)	Inconnue	Fuite probable dans une conduite pendant la première semaine de mars	7,000 à 14,000 (volume estimé)	Fuel de soude C	On a observé du pétrole en mai 1974 dans le fleuve St-Laurent entre Sorel et Montréal. On a découvert que la source du déversement du pétrole était un fossé de drainage à Montréal. Le pétrole s'est écoulé d'une zone industrielle dans un fossé, puis dans les égouts de Montréal, avant de gagner le fleuve.
Rivière Salmon près de Shelly, à 3 mi en amont de la rivière Fraser (Colombie-Britannique)	14 mai 1974	Rupture d'un oléoduc de 12 po au franchissement de la rivière	164,000	Brut léger	L'oléoduc était enterré dans le substrat graveleux du lit fluvial. Le pétrole n'a pu être endigué sur la rivière Salmon et 3 mi de rivage ont été fortement pollués. Quelques nappes d'huile ont brûlé, et certaines ont été récupérées au moyen de produits absorbants. Le pétrole a continué à s'écouler dans la rivière Fraser à environ 4 mi/h, se mêlant à l'eau dans le courant, et formant des reflets huileux à la surface. Trois jours après, on a estimé que le déversement avait atteint Hope (C.-B), mais on n'a relevé que des traces de pétrole au cours de reconnaissances aériennes.
Fleuve Mackenzie (T.N.-O.)	1 <sup>er</sup> juin 1974	Un réservoir de stockage a débordé	49,000	Inconnu	Environ 350 gal se sont échappés de l'enceinte dans le fleuve et ont été endigués à l'aide d'estacades flottantes.
Rivière Flat (T.N.-O.)	5 juin 1974	Une fuite s'est produite	10,000 (volume maximum estimé)	Gas-oil	On a signalé des fuites de pétrole dans la rivière Flat au rythme d'environ 1 gal par minute.


Tableau IV-1. Suite

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Fleuve Mackenzie, Norman Wells (T.N.-O.)	10 juin 1974	Rupture d'un oléoduc	49,000	Gas-oil	Le pétrole s'est infiltré dans des graviers, et 1,750 gal se sont déversés dans le fleuve Mackenzie. Il s'est formé une nappe de gas-oil de 15 mi de long sur le fleuve. Le combustible se déplaçait rapidement dans le milieu du courant.
Fleuve St-Laurent, Montréal-Est (Québec)	6 juil. 1974	Rupture d'une crépine	18,700	Carburacteur B	Le sol a absorbé une partie du pétrole le reste s'est déversé dans les égouts puis dans le fleuve St-Laurent.
Fleuve Mackenzie, Fort Simpson (T.N.-O.)	11 juil. 1974	Un tuyau d'évacuation a éclaté dans une barge	100	Fuel de soute C	Environ 40 gal se sont déversés dans le fleuve Mackenzie.
Rivière Salmon, Truro (Nouvelle-Écosse)	16 juil. 1974	Probablement une vanne défectueuse dans les conduites de chauffage	200	Fuel de soute C	Il s'est produit des fuites de pétrole d'une conduite dans un égout d'eaux pluviales puis dans une petite mare, finalement le pétrole s'est déversé dans la rivière Salmon. L'herbe était recouverte de pétrole le long des berges.
Fleuve St-Laurent, Port de Montréal (Québec)	23 juil. 1974	Cause inconnue, on soupçonne un épurateur défectueux	Inconnu	Inconnu	On a observé une nappe de pétrole de 15 mi de long à partir des bassins du port.
Fleuve Yukon, Whitehorse (Yukon)	8 août 1974	Un réservoir a débordé	600	Gas-oil	On a observé de petites nappes de pétrole sur le fleuve, en aval.
Rivière Camsell, (T.N.-O.)	12 août 1974	Défaut d'étanchéité d'un joint de la tuyauterie menant des docks au parc de stockage	400	Gas-oil	Le combustible s'est répandu lentement dans la rivière Camsell, et l'on a observé des reflets huileux à la surface de la rivière.
Fleuve St-Laurent, Montréal (Québec)	13 août 1974	Inconnue	Inconnu	Fuel de soute C	On a observé un écoulement continu de pétrole dans l'eau au-dessous du pont Champlain.
Route du Mackenzie, près de Fort Simpson (T.N.-O.)	13 août 1974	Un camion-citerne s'est renversé	5,900	Gas-oil	La plus grande partie du gas-oil s'est infiltrée dans le sol et a pris feu. Environ 100 gal ont pénétré dans un ruisseau et se sont déversés dans la rivière Liard.
Rivière au Foin (T.N.-O.)	13 août 1974	Un réservoir de stockage sur ponton a débordé	200	JP 4 Carburacteur	On a observé une nappe de pétrole sur la rivière au foin.
Rivière Ste-Claire	24 août 1974	Un raccord flexible s'est rompu	175	Fuel de soute	On n'a pas observé le comportement du pétrole.

Tableau IV-1. Suite

Lieu de déversement du pétrole	Date	Cause	Volume déversé (gal)	Type de pétrole	Comportement du pétrole
Fleuve St-Laurent, Montréal (Québec)	7 sept. 1974	Rupture d'une conduite	70	Inconnu	Au moment d'un essai effectué sur un oléoduc de 10 po placé dans le fleuve, on a observé une remontée de pétrole à la surface de l'eau.
Elmsdale (Nouvelle-Écosse)	9 sept. 1974	Déraillement d'un train	3,500	Fuel oil et huile moteur	L'huile et le fuel se sont déversés dans un cours d'eau et dans la rivière Shunubenacadie.
Northwest River (Labrador)	11 sept. 1974	Rupture d'un tuyau	200	Gas-oil	Le gas-oil a gagné la rivière par une conduite d'égout.
Fleuve St-Laurent, entre Leclerville et Lotbinière (Québec)	13 sept. 1974	Inconnue	35	Fuel oil	Nappe de pétrole de 2 pi de large le long de la rive sud sur 7 à 8 mi.
Haines Junction (Yukon)	3 oct. 1974	Une vanne d'un tuyau d'alimentation en carburant est restée ouverte	150	Gas-oil	Le gas-oil s'est écoulé dans la rivière.
Rivière Saguenay, Chicoutimi (Québec)	18 oct. 1974	Rupture de l'oléoduc qui passe sous la rivière Saguenay	76,000	Carburant B pour turbo-machine d'aviation	La vitesse d'évaporation de ce combustible est assez élevée, et l'on estime que 24 h plus tard, le volume restant n'était plus que de 7,600 gal.
Rivière Beauport (Québec)	1 <sup>er</sup> nov. 1974	Un camion s'est renversé	2,700 1,300	Gas-oil et fuel domestique	Une partie du pétrole s'est écoulée dans la rivière Beauport.
Aéroport de Québec (Québec)	7 nov. 1974	Un camion s'est renversé	6,600	Carburéacteur	Le carburéacteur s'est déversé dans un cours d'eau, mais a été endigué avant d'atteindre le fleuve.
Fleuve St-Laurent, près de Cherry Island (É.-U.)	21 nov. 1974	Un navire a heurté le fond et a coulé par 194 pi d'eau		Gas-oil	Le gas-oil s'est échappé par la tuyauterie d'aération d'un réservoir de carburant. En remontant à la surface de l'eau, le gas-oil a été émulsionné, puis il s'est dispersé dans un courant de 3 à 7 noeuds.
Rivière House, (Alberta)	27 déc. 1974	Un oléoduc de 16 po s'est rompu, probablement à cause d'un glissement de terrain sur les berges ou de la pression due au poids de la couverture sédimentaire	210,000	Pétrole synthétique	L'oléoduc passe sous la rivière House. Du pétrole s'est infiltré dans une berge escarpée à environ 300 verges de la rivière, et une quantité considérable de pétrole s'est écoulée dans la <i>glace</i> de la rivière, puis a gagné une zone d'eau dégagée des glaces à environ 3.5 mi en aval. Des estacades ont été déployées à 3.5 mi en aval et au confluent des rivières Athabasca et House. On a réussi à brûler une nappe de pétrole sur une surface d'eau dégagée des glaces. Environ 25,000 gal de pétrole ont été récupérés dans une mare de décantation en amont d'un barrage, toutefois, lorsque la couche de pétrole est mince, elle forme une bouillie de pétrole et de glace qui bouche les pompes.
Rivière des Outaouais, Montebello (Québec)	27 déc. 1974	Un camion-citerne s'est renversé	1,800	Fuel domestique	La plus grande partie du fuel s'est déversée dans un petit ruisseau, puis dans la rivière des Outaouais.

Environment Canada Library, Burlington  
  
3 9055 1018 8149 7

 Environment Canada    Environnement Canada  
2031201F  
Chen, E.C.  
C-1  
JF