Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

Environment Canada
Environmental Protection Service

Étude des paramètres de fonctionnement du bâtiment de confinement et de récupération des déversements d'hydrocarbures (OSCAR)

Rég. Québec Biblio. Env. Canada Library
38 502 828

TD
182
R46
4-EC-81-5F

Développement technologique
Rapport SPE 4-EC-81-5F

Direction générale du contrôle des incidences environnementales
Décembre 1981

SÉRIE DE RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rapports sur le développement technologique décrivent l'outillage et les procédés techniques, ainsi que les résultats des études portant sur les laboratoires, les installations d'essai, les démonstrations, ou l'évaluation des équipements. Ces rapports constituent une source centrale de renseignements sur les activités et la mise en valeur du Service de la protection de l'environnement.

Les autres catégories de la série de rapports du S.P.E. comprennent les groupes suivants: règlements, codes et accords; politique et planification; analyse économique et technique; surveillance; guides de formation; rapports et exposés à l'enquête publique; et impacts environnementaux.

Les demandes relatives aux rapports du Service de la protection de l'environnement doivent être adressées au Service de la protection de l'environnement, ministère de l'Environnement, Ottawa, Ontario, Canada K1A 1C8.

0021982E S
7017549E M

Étude des paramètres de fonctionnement du bâtiment de confinement et de récupération des déversements d'hydrocarbures (OSCAR)

par Western Canada Hydraulic Laboratories Ltd.

RECEIVED
FEB 16 1982
Mat. Mgmt. Section
Fin. & Admin. Branch

ENVIRONNEMENT CANADA
BIBLIOTHÈQUE
RÉGION DU QUÉBEC

DREI

Direction des interventions d'urgence
Direction générale du contrôle des incidences environnementales
Service de la protection de l'environnement
Environnement Canada

TD
178.7
.C3
C5511
NO. 81-5F

Publication distribuée par
Environnement Canada
Ottawa
K1A 1C8

Edition française de
Investigation of the Operating Parameters of the Oil Spill Containment and Recovery (OSCAR) Vessel
préparée par le Module d'édition française
d'Environnement Canada

N° de catalogue: En 46-4/81-5F
ISBN: 0-662-91461-9

©
Ministre des Approvisionnements et Services

RÉSUMÉ

Cette étude, fondée sur des recherches expérimentales et analytiques, porte sur deux tambours tournant en sens inverse l'un par rapport à l'autre, et qui sont destinés à la récupération des hydrocarbures déversés accidentellement. Le processus de récupération devait à l'orgigine être basé sur une combinaison de deux mécanismes:

1. pompage des hydrocarbures et de l'eau entre les tambours; et
2. adhérence oléophile des hydrocarbures aux tambours.

Une installation d'essai comportant deux tambours tournant en sens opposés, de 2,44 m de diamètre chacun, a été montée devant une fenêtre d'observation de 5 m de long dans un canal de laboratoire. Des courants ont été induits dans le canal pour simuler le déplacement du bâtiment remorqué. On a étudié le rendement des tambours à différentes vitesses et différentes profondeurs d'immersion pour récupérer des nappes de combustible diesel léger et d'un mélange plus lourd de combustible de soute "C" et de diesel. On a observé le processus de récupération et mesuré le taux de récupération.

Les résultats des essais montrent que le pompage joue un rôle négligeable dans la récupération.

Un modèle mathématique élémentaire a été mis au point pour la récupération par substance oléophile; il a permis de prévoir des taux de récupération du combustible diesel léger voisins, à 16 p. cent près, des valeurs mesurées expérimentalement à des vitesses faibles de rotation des tambours. Des résultats de la modélisation et des expériences, on a tiré des lignes directrices en vue d'obtenir un rendement optimal d'un appareil de confinement et de récupération des déversements d'hydrocarbures (OSCAR) existant, qui comporte deux tambours tournant en sens opposés. Il a été recommandé de procéder à une étude mathématique plus poussée du processus de récupération par substance oléophile afin d'établir les dimensions et les paramètres de fonctionnement optimaux des tambours des futurs appareils de récupération par substance oléophile équipés d'un tel système.

ABSTRACT

A study involving both experimental and analytical investigations was carried out on two contra-rotating drums as a means to recover spilled oil. The recovery process was originally postulated to be a combination of two mechanisms:

1. the pumping of oil and water up between the contra-rotating drums; and
2. oleophilic adhesion of oil to the drums.

A test facility involving two contra-rotating drums of 2.44 m diameter was established in front of a 5 m long viewing window in a laboratory flume. Currents were generated in the flume to represent towing speeds. Drum operation at varying speeds and depths of submergence was studied using light diesel oil and a heavier mixture of bunker "C" and diesel oils. Drum recovery processes were observed and recovery rates measured.

The test results showed that the pumping action played no discernible part in the recovery process.

An elementary mathematical model was developed for the oleophilic recovery process; this allowed for prediction of recovery rates of the light diesel fuel to within 16 percent of the experimentally determined values at low drum speeds. From the model and experimental results, guidelines were drawn for the optimum operation of an existing oil spill containment and recovery (OSCAR) device using contra-rotating drums. Further mathematical investigation into the oleophilic recovery process has been recommended to establish optimum drum sizes and operating parameters for future oleophilic drum recovery devices.

AVANT-PROPOS

Le présent rapport fait état des résultats d'une étude sur les paramètres de fonctionnement du bâtiment de confinement et de récupération des déversements d'hydrocarbures (OSCAR). Le travail a été effectué par Western Canada Hydraulic Laboratories Ltd. de Port Coquitlam (Colombie-Britannique), en vertu d'un contrat passé avec le Service de la protection de l'environnement.

REMERCIEMENTS

Le capitaine D. Sjoquist de Seaspan International Ltd. a fourni au cours de la présente étude des données et des observations tirées d'opérations antérieures de nettoyage de déversements d'hydrocarbures. Son aide à cet effet et à la mise au point des fenêtres d'observation de l'installation prototype a été grandement appréciée.

Nous remercions aussi, avec empressement, M. L. Solsberg de la Direction des interventions d'urgence, à Ottawa, pour ses conseils à titre d'autorité scientifique pour le projet.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé III
Abstract V
Avant-propos VII
Remerciements VII
Liste des figures X
Liste des tableaux X
Conclusions et recommandations XI

1 Introduction 1
1.1 Conception de la machine prototype 1
1.2 Principes théoriques de fonctionnement 3

2 Installation d'essai 3
2.1 Lois de similitude 3
2.2 Construction de l'installation 4

3 Plan de l'étude 8
3.1 Plan général 8
3.2 Programme des essais 8

4 Marche à suivre pendant les essais 11
4.1 Essais préparatoires 11
4.2 Essais en canal 12

5 Résultats des essais 18
5.1 Essais préparatoires 18
5.2 Études en canal 18
5.3 Effet des dimensions des tambours 20

6 Modèle analytique du processus de récupération 21
6.1 Paramètres importants dans le processus d'OSCAR 21
6.2 Modèle analytique 22
6.3 Couche limite d'eau 23
6.4 Champ d'application du modèle de la couche limite 23
6.5 Comparaison des taux de récupération prévu et réel 23

7 Lignes directrices pour le fonctionnement d'OSCAR 25

Références 27

Annexe I Entraînement des pellicules liquides 29
Annexe II Théorie de la couche limite d'hydrocarbures 35
Annexe III Couche limite d'eau 41

LISTE DES FIGURES

1 Bâtiment prototype 2
2 Schéma de l'installation d'essai 5
3 Tambours d'essai en canal 6
4 Viscosité dynamique des hydrocarbures et de l'eau 10
5 Quantité d'hydrocarbures recueillis par différentes surfaces 13
6 Quantité d'hydrocarbures récupérés en fonction de l'épaisseur de la nappe d'hydrocarbures 14
7 Schéma de la couche limite hydrocarbures-eau 15
8 Effets des variations des paramètres de fonctionnement 17
9 Schéma de l'équilibre des forces et du bilan massique par unité de largeur 38

LISTE DES TABLEAUX

1 Propriétés des hydrocarbures d'essai à l'étude et de l'eau 9
2 Programme des essais en canal 11
3 Résultats des essais en canal 16
4 Comparaison des taux de récupération prévu et observé 24

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Conclusions

Cette étude a permis de réaliser que le rendement du prototype OSCAR est limité par les facteurs suivants:

1. les tambours à surface lisse, tournant en sens opposés, sont incapables de retirer par pompage les hydrocarbures qui sont à la surface de l'eau. Ils récupèrent les hydrocarbures par adhérence oléophile à leur surface d'acier.

2. Les hydrocarbures ne sont récupérés que par le tambour d'amont. L'épaisseur de la pellicule d'hydrocarbures qui se forme sur le tambour est fonction de l'épaisseur de la nappe d'hydrocarbures sur l'eau, des propriétés des hydrocarbures et de la vitesse tangentielle des tambours. L'épaisseur de la pellicule d'hydrocarbures augmente en fonction de la vitesse tangentielle des tambours.

3. Une vitesse de rotation élevée ou une grande profondeur d'immersion des tambours entraînent l'émulsification des hydrocarbures se trouvant dans l'eau, sous les tambours; par conséquent, l'épaisseur de la couche d'hydrocarbures récupérés par le tambour s'en trouve diminuée.

4. Le tambour d'aval joue un rôle négligeable dans la récupération lorsque le bâtiment avance sur l'eau. Les deux tambours ont des taux de récupération égaux lorsque le bâtiment est stationnaire.

5. Il y a émulsification des hydrocarbures entraînés sous les tambours lorsque le nombre de Reynolds de la couche limite d'eau est supérieure à 5×10^5.

6. L'espacement entre les deux tambours tournant en sens opposés ne joue pas un rôle important dans la récupération lorsqu'il n'y a aucun contact entre les couches d'hydrocarbures et d'eau recouvrant chaque tambour.

7. La profondeur d'immersion des tambours du prototype OSCAR, de 2,44 m de diamètre, devrait être au minimum afin de réduire les effets des vagues (ondes).

8. Les tambours du prototype OSCAR devraient tourner à une vitesse égale ou inférieure à 5 tr/min lorsqu'on cherche à récupérer de minces nappes d'hydrocarbures ou lorsque la profondeur d'immersion des tambours est supérieure à 30 cm, afin d'optimiser le taux de récupération et de minimiser l'entraînement des hydrocarbures sous les tambours.

9. La vitesse optimale de rotation des tambours, pour le prototype OSCAR, lorsqu'on cherche à récupérer des nappes de combustible diesel léger de plus de 1,0 cm d'épaisseur, en l'absence de vagues (ondes), peut être portée jusqu'à 30 tr/min. À cette vitesse, les tambours devraient être immergés à une profondeur inférieure à 4 cm afin de minimiser l'émulsification.

10. La vitesse de propulsion du bâtiment devrait être choisie en fonction de l'épaisseur de la nappe d'hydrocarbures, pour qu'une couche d'une certaine épaisseur s'accumule à l'avant des tambours et que le taux de récupération soit convenable.

11. Un modèle mathématique de la formation de la couche limite d'hydrocarbures et de la couche limite d'eau sur un tambour en rotation peut être mis au point pour prévoir les variations des taux de récupération par substance oléophile en fonction des dimensions des tambours, de leur vitesse de rotation et de la viscosité des hydrocarbures, pourvu que la vitesse de rotation soit suffisamment faible pour que le nombre de Reynolds de la couche limite d'eau soit inférieur à 5×10^5.

12. Le modèle mathématique dérivé dans le cadre de l'étude pour la récupération du combustible diesel à de faibles vitesses de rotation des tambours a donné un taux de récupération qui s'écarte de 16 p. cent du taux réel de récupération de l'installation d'essai.

Recommandations

Les résultats de l'étude ont mené aux recommandations suivantes :

1. Une étude analytique plus poussée sur le processus de récupération par substance oléophile par des tambours devrait être effectuée, et un modèle mathématique devrait être préparé pour évaluer avec précision les effets des dimensions et des paramètres de fonctionnement des tambours sur le taux de récupération des hydrocarbures.

2. Des études en laboratoire devraient être menées pour établir la force de la tension à l'interface entre les hydrocarbures et l'acier, ainsi que les forces de cohésion internes dans les hydrocarbures susceptibles d'être récupérés par OSCAR.

3. Il faudrait procéder à des recherches en vue d'augmenter le rendement du prototype OSCAR. Ces recherches devraient porter sur le pompage, dans les coques de stockage, de l'émulsion emprisonnée entre les tambours, ou sur la conception d'un filtre oléophile qui serait installé entre les tambours. Ce dernier éliminerait la couche limite d'eau qui adhère au tambour d'aval et absorberait les hydrocarbures émulsifiés qui s'accumulent entre les tambours, pour les redéposer sur le tambour d'aval.

1 INTRODUCTION

1.1 Conception de la machine prototype

Un bâtiment de confinement et de récupération des hydrocarbures déversés en mer (OSCAR – Oil Spill Containment and Recovery Vessel), amphidrôme et non propulsé, a été conçu par le capitaine J. Stell & Co. de Victoria en 1972 et construit par la Gulf of Georgia Towing Co. Ltd. grâce à une subvention du ministère fédéral des Approvisionnements et Services.

Ce bâtiment, de type "catamaran", comporte deux tambours d'acier identiques de 3,05 m de long par 2,44 m de diamètre, montés entre les coques, perpendiculairement à celles-ci et tournant en sens opposés (voir figure 1). Les tambours, entraînés par des moteurs hydrauliques, tournent, leurs parties inférieures l'une vers l'autre, de sorte que les hydrocarbures à la surface de la mer sont poussés entre eux. Le bâtiment est conçu de façon que les hydrocarbures soient soulevés par les tambours, en soient détachés par raclage et soient acheminés par gravité dans les deux coques de stockage. Le fond de chaque coque comporte deux soupapes qui permettent à toute eau libre recueillie avec les hydrocarbures de s'en séparer et de retourner à la mer par écoulement par gravité. Le bâtiment a été conçu pour recueillir tout fluide en surface, et grâce au processus de séparation qui s'établit dans les coques de stockage, il n'est plus nécessaire d'avoir recours à une récupération sélective des hydrocarbures à la surface de l'eau. On affirme que les tambours peuvent récupérer jusqu'à 100 p. cent des hydrocarbures déversés lorsqu'ils fonctionnent assez longtemps.

Le concepteur affirme que le fonctionnement des tambours n'est pas entravé par les débris flottants ou par une houle modérée. La récupération est jugée efficace quelle que soit la qualité des hydrocarbures déversés. Seaspan International Ltd. a indiqué avoir atteint un taux de récupération d'environ 22,5 litres/minute de combustible diesel marin léger lors d'un déversement dans le port de Vancouver. On a aussi signalé que le bâtiment avait réussi à récupérer du combustible de soute "C" lourd dans l'Inlet Burrard. Petro Clearance Ltd. d'Hamilton (Bermudes) a déposé une demande de brevet pour le principe de fonctionnement.

Le personnel du Service de la protection de l'environnement (SPE) a été témoin des essais préliminaires d'OSCAR en 1974. Le concept d'OSCAR a semblé prometteur, et on a jugé qu'il était justifié de procéder à des études plus poussées pour examiner son principe de fonctionnement et pour évaluer son rendement par rapport à celui d'autres bâtiments de récupération d'hydrocarbures déversés en mer. Les résultats des essais préliminaires ont été divulgués, ainsi que ceux d'essais comparatifs portant sur six autres types généraux de bâtiments de récupération des hydrocarbures (Solsberg et coll., 1976). Il a été recommandé d'effectuer d'autres essais sur le concept du tambour oléophile afin de mieux étudier son principe de fonctionnement et d'optimiser ses paramètres de fonctionnement.

La présente étude a donc pour but d'analyser les principes de fonctionnement régissant la collecte des hydrocarbures à l'aide de deux tambours tournant en sens opposés et d'établir les effets relatifs du pompage et de l'adhérence par substance oléophile des hydrocarbures dans le processus de récupération. L'étude vise en particulier à analyser l'effet d'une variation (1) de la vitesse de rotation des tambours, (2) de la distance entre les tambours, (3) de la profondeur d'immersion des tambours et (4) de la vitesse du bâtiment, sur la vitesse de récupération de nappes d'hydrocarbures de différents types et de différentes épaisseurs.

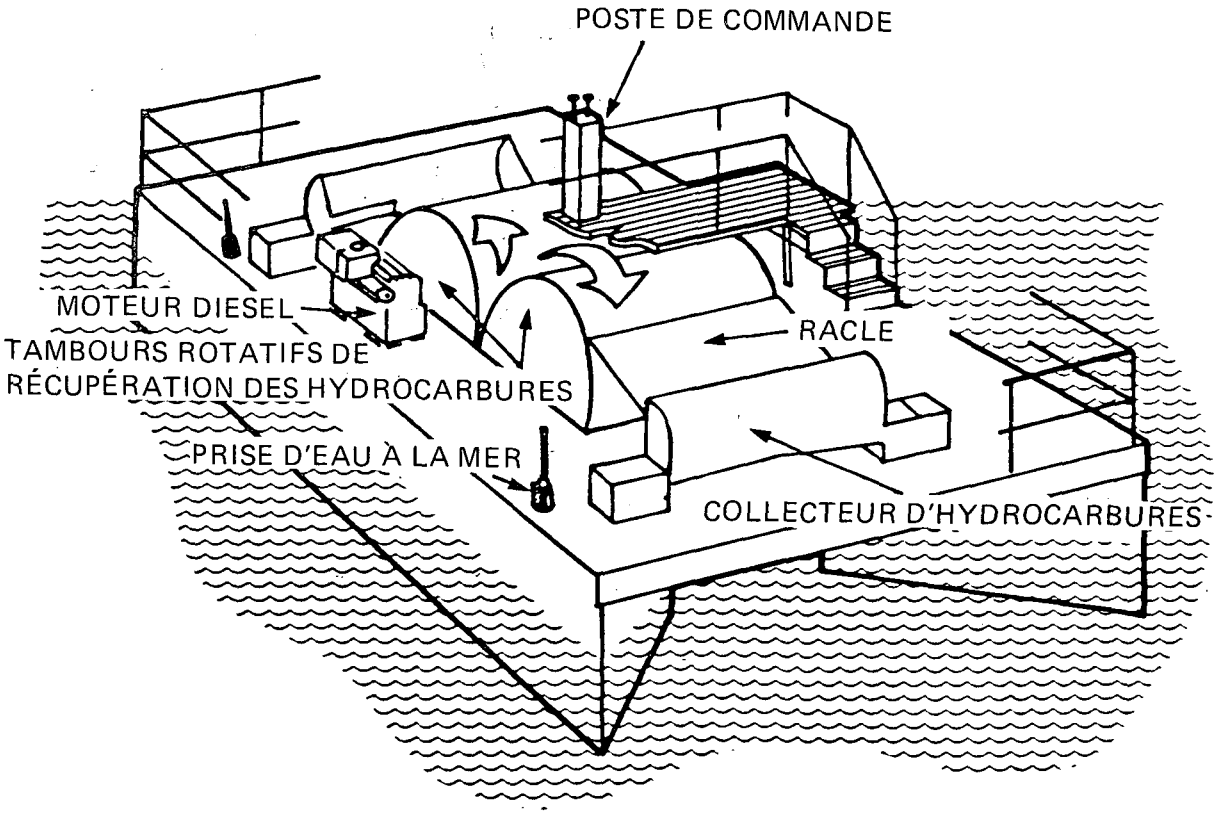


Figure 1 Bâtiment prototype

1.2 Principes théoriques de fonctionnement

L'efficacité du procédé de nettoyage d'OSCAR dépend, estime-t-on, de deux facteurs:

1. Enlèvement des hydrocarbures de la surface de l'eau par adhérence oléophile à la surface d'acier des deux tambours; et
2. Pompage d'un mélange d'hydrocarbures et d'eau entre les tambours, par suite de la faible distance séparant les tambours de leur rotation en sens opposés.

Le caractère oléophile, ou adhérence des hydrocarbures à la surface des tambours, varie selon la composition et les propriétés des hydrocarbures; il varie aussi selon les caractéristiques du matériau dont est composée la surface du tambour. L'épaisseur d'une couche d'hydrocarbures retirés de la surface de l'eau par les tambours sous l'effet de l'adhérence oléophile ou par pompage est fonction de la viscosité des hydrocarbures, de leur densité et de la tension à l'interface hydrocarbures-eau. Elle est aussi fonction de la vitesse d'alimentation en hydrocarbures, du rayon des tambours et de leur vitesse de rotation ainsi que de l'angle auquel les tambours doivent prendre les hydrocarbures, et de la hauteur à laquelle ils doivent les élever.

Des données ont été recueillies sur l'importance relative qu'ont les facteurs susmentionnés par rapport au bon fonctionnement de l'appareil.

*

* *

2 INSTALLATION D'ESSAI

2.1 Lois de similitude

Les propriétés des hydrocarbures et de l'eau qui influent le plus sur la vitesse de récupération des hydrocarbures par les tambours rotatifs sont:

1. la tension à l'interface (σ);
2. la viscosité (ν); et
3. le poids volumique (γ).

Les relations entre ces facteurs, et entre la quantité de mouvement et la force d'attraction gravitationnelle des fluides doivent être conservées en vue d'études comparatives du processus de récupération.

Pour modéliser le processus avec précision, il faut que les paramètres sans dimensions suivants aient les mêmes valeurs numériques dans le modèle et dans le prototype:

1. Nombre densimétrique de Froude,

$$F_D = \frac{V}{\left(\frac{\rho_\omega - \rho_\omega}{\rho_\omega} \; gd\right)^{0.5}}$$

qui fait le lien entre les forces d'inertie et la poussée hydrostatique relative du fluide léger;

2. Nombre de Reynolds,

$$R_N = \frac{VD}{\nu}$$

qui fait le lien entre les forces d'inertie et la viscosité; et

3. Nombre de Weber,

$$W = \frac{V(\rho_o L)^{0.5}}{\sigma^{0.5}}$$

qui fait le lien entre les forces d'inertie et la tension superficielle;

V = vitesse
ρ_ω = densité de l'eau
ρ_o = densité des hydrocarbures
g = constante d'accélération due à la pesanteur
d = profondeur caractéristique et
L = longueur caractéristique

La comparaison des paramètres susmentionnés montre que les interrelations recherchées entre les échelles de longueur, de profondeur et de vitesse d'une part et les différentes propriétés des fluides nécessaires pour reproduire une opération de récupération d'une nappe d'hydrocarbures d'autre part ne peuvent être établies qu'à une échelle de 1:1, les fluides à l'étude étant les hydrocarbures et l'eau en conditions réelles. Dans le cadre de l'étude, il a donc fallu construire un modèle grandeur réelle des tambours prototypes dans le plan tant longitudinal que vertical. Dans le plan transversal la dimension du modèle ne pose aucun problème puisque la vitesse de récupération par le tambour par unité de largeur reste la même, à l'exception des effets de bout qui sont minimes sur les côtés des tambours.

2.2 Construction de l'installation

Une installation d'essai (échelle industrielle) a été construite afin d'étudier le fonctionnement de tambours tournant en sens opposés, semblables à ceux utilisés avec l'OSCAR de la Gulf of Georgia Towing Co. Ltd. L'installation a été conçue de façon à permettre une étude des effets d'une variation des dimensions des tambours et des paramètres de fonctionnement. Deux tambours prototypes, tournant en sens opposés, de 1,22 m de longueur et de 2,44 m de diamètre, ont été fabriqués à l'aide de feuilles d'acier de 2,7 mm d'épaisseur enroulées sur des gabarits circulaires en contre-plaqué de 1,9 cm d'épaisseur. Les tambours, montés sur des axes de 4,4 cm, reposent sur un chariot à roulettes de 7 m sur 1,5 m. Le chariot est formé d'un cadre de billes de bois grossièrement équarries de 10 cm sur 10 cm comportant des supports transversaux d'aluminium. On commande l'espacement des tambours en tournant une tige filetée qui règle la position des paliers de l'arbre de l'un des tambours. Le chariot qui repose sur des roulettes de caoutchouc se déplace sur des rails d'acier posées au-dessus d'un canal de 29 m de long (voir la figure 2.

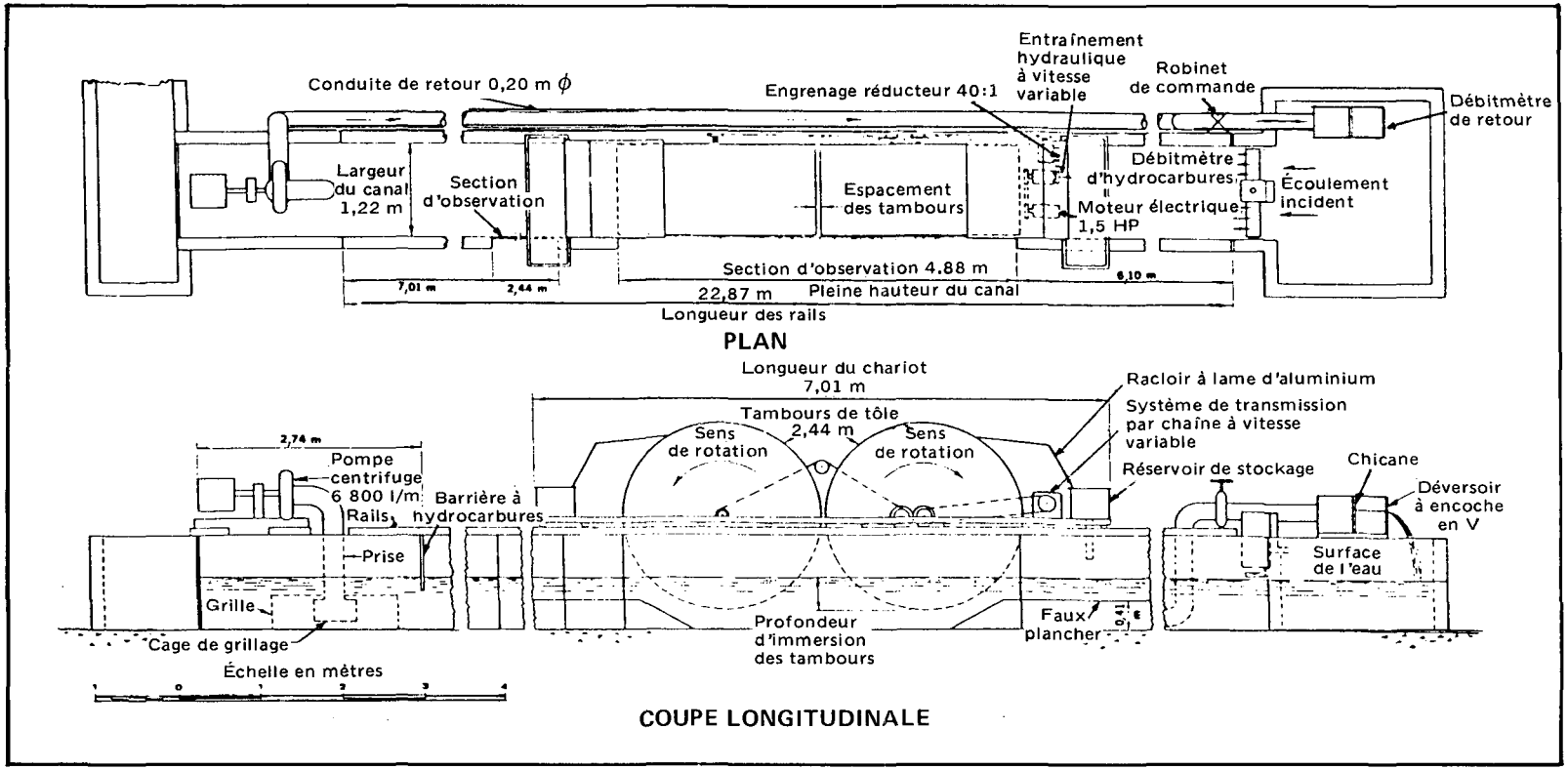
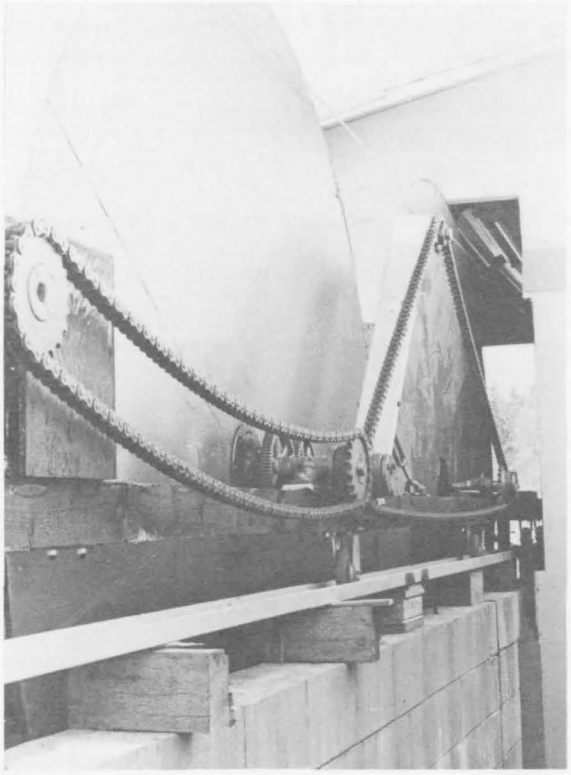


Figure 2 Schéma de l'installation d'essai

A) Tambours montés sur chariot



B) Système de transmission par chaîne des tambours tournant en sens opposés

Figure 3 Tambours d'essai en canal

Les enveloppes des tambours ont été cylindrées et fermées par des joints de soudure à la machine, ce qui a permis d'obtenir une surface uniforme et continue (voir la figure 3). Le mouvement de rotation des tambours est imprimé par un moteur électrique de 1,2 kW par le truchement d'une transmission par chaîne à vitesse variable. Les hydrocarbures sont détachés des tambours par des racloirs d'aluminium, semblables à ceux utilisés dans le prototype, et sont acheminés vers les réservoirs de stockage par des bacs de tôle d'acier galvanisé de 1,5 mm, montés sur charnières. Les charnières permettent de maintenir les racloirs en contact étroit avec les tambours, même si la tôle s'use. Les racloirs peuvent être relevés au besoin, au moyen de tendeurs aériens.

Un moteur électrique à vitesse variable de 7,5 kW, installé à l'une des extrémités du canal, est relié à un treuil sur lequel est enroulé un câble sans fin de 1 cm de diamètre. Cet appareil sert à remorquer le chariot dans l'un ou l'autre sens, sur une distance de 23 m au-dessus du canal. Le câble part d'une extrémité du chariot, il passe autour du treuil électrique et revient, suspendu à des poulies, se terminer à l'autre extrémité du canal. Les fils électriques d'alimentation du moteur des tambours sont aussi aériens et se déplacent avec le chariot, en exerçant une résistance négligeable.

Une pompe centrifuge de 18 kW, capable de débiter 6 800 l/min, a été installée à l'extrémité aval du canal pour générer des courants pendant des essais portant sur l'étude du fonctionnement des tambours, alors que le chariot était fixe par rapport à une fenêtre d'observation. Une chicane verticale autour de la prise de la pompe pour minimiser l'effet de vortex empêchait les hydrocarbures d'être aspirés par cette dernière. Le débit de la pompe est mesuré au moyen d'un déversoir à encoche en V et commandé par une vanne à l'extrémité amont du canal.

Un plancher amovible de 40,5 cm de hauteur, en tôle galvanisée, a été installé à l'approche des tambours et sous ces derniers afin d'induire des vitesses d'écoulement à peu près égales, contre et sous les tambours pendant les essais sans remorquage. Le faux plancher est incliné vers les tambours, de part et d'autre de ceux-ci, suivant un angle d'environ 30°. Avec une hauteur d'eau de 71 cm dans le canal, équivalente à une profondeur d'immersion des tambours de 30,5 cm, la hauteur d'eau au-dessus du faux plancher était la même que sous les tambours.

Une pompe de 0,4 kW achemine les hydrocarbures servant aux essais; à partir de réservoirs de 200 l vers une gouttière de distribution en tôle galvanisée disposée en travers de la partie amont du canal. Un déversoir réglable en tôle d'acier assure une charge constante au-dessus d'un orifice circulaire placé horizontalement dans le système d'alimentation menant à la gouttière de distribution.

*

* *

3 PLAN DE L'ÉTUDE

3.1 Plan général

Le plan de l'étude comprend trois parties:

Première partie

Essais préparatoires afin de déterminer quels devaient être les hydrocarbures d'essai et quelle surface devait avoir les tambours.

Deuxième partie

Études en canal du principe de fonctionnement des tambours, en vue de recueillir des données d'étalonnage pour des analyses ultérieures.

Troisième partie

Analyses pour mieux comprendre le processus de récupération des hydrocarbures et pour mettre au point, à partir des données recueillies dans la deuxième partie, une méthode numérique de prévision dans le but d'optimiser la conception et le fonctionnement d'OSCAR.

3.2 Programme des essais

Essais préparatoires – première partie

Six hydrocarbures ont été examinés en vue du programme d'essais de la deuxième partie:

Combustible Diesel,	Essoluble 30
Combustible Royal,	Mazout n° 46,
Mélange n° 54	Combustible de soute C.

Les propriétés de ces hydrocarbures sont présentées au tableau 1 et à la figure 4.

Sept plaques d'essai comportant des surfaces de caractéristiques différentes ont été étudiées afin de déterminer leur efficacité relative lors de la récupération du mazout Royal à la surface de l'eau.

Les plaques étaient recouvertes des matériaux suivants:

Aluminium,	Peinture au chromate,
Acier légèrement rouillé,	Peinture au plomb rouge,
Acier modérément rouillé,	Feuille de polypropylène.
Acier galvanisé,	

Les résultats de ces essais ont déterminé le choix de la surface des tambours et des hydrocarbures d'essai pour les études en canal de la deuxième partie.

Essais en canal – deuxième partie

Le programme d'essais en canal est présenté au tableau 2. On a étudié les taux de récupération obtenus avec deux types d'hydrocarbures. On a fait varier la vitesse des tambours de 5 à 15 tr/min à des profondeurs d'immersion variant entre 11,5 et 45,0 cm.

Après les essais avec le tamour de 2,44 m de diamètre situé devant la fenêtre d'observation du canal, on a décidé de procéder à d'autres essais avec le système de remorquage du chariot. D'autres travaux ont été consacrés à l'étude théorique et mathématique du processus de récupération à l'aide de tambours.

Tableau 1
Propriétés de l'eau et des hydrocarbures à l'essai

Type d'hydrocarbures	Poids spécifique APS	Densité	Viscosité 0 °C Dynamique Pa.s	Viscosité 0 °C Cinétatique cm^2/s	Viscosité 8 °C Dynamique Pa.s	Viscosité 8 °C Cinématique cm^2/s	Viscosité 15 °C Dynamique Pa.s	Viscosité 15 °C Cinématique cm^2/s	Tension superficielle à l'air libre mN/m 0 °C	8 °C	15 °C
Eau		0,999	0,0018	0,018	0,0014	0,014	0,0011	0,011	75,60	74,58	73,56
Diesel	38,0	0,835	0,01	0,12	0,008	0,093	0,006	0,074		23 à 32	
Royal	23,0	0,916	0,098	1,07	0,068	0,744	0,06	0,651		23 à 38	
Mélange 54	22,8	0,917	0,16	1,74	0,098	1,07	0,074	0,807		23 à 38	
Essolube 30	27,9	0,888	1,96	22,03	0,548	5,95	0,494	5,39		33 à 54	
Mazout 46	17,4	0,950	7,68	80,86	1,89	19,89	0,848	8,92		–	
Bunker "C"	13,8	0,974	–	–	–	–	–	–		–	

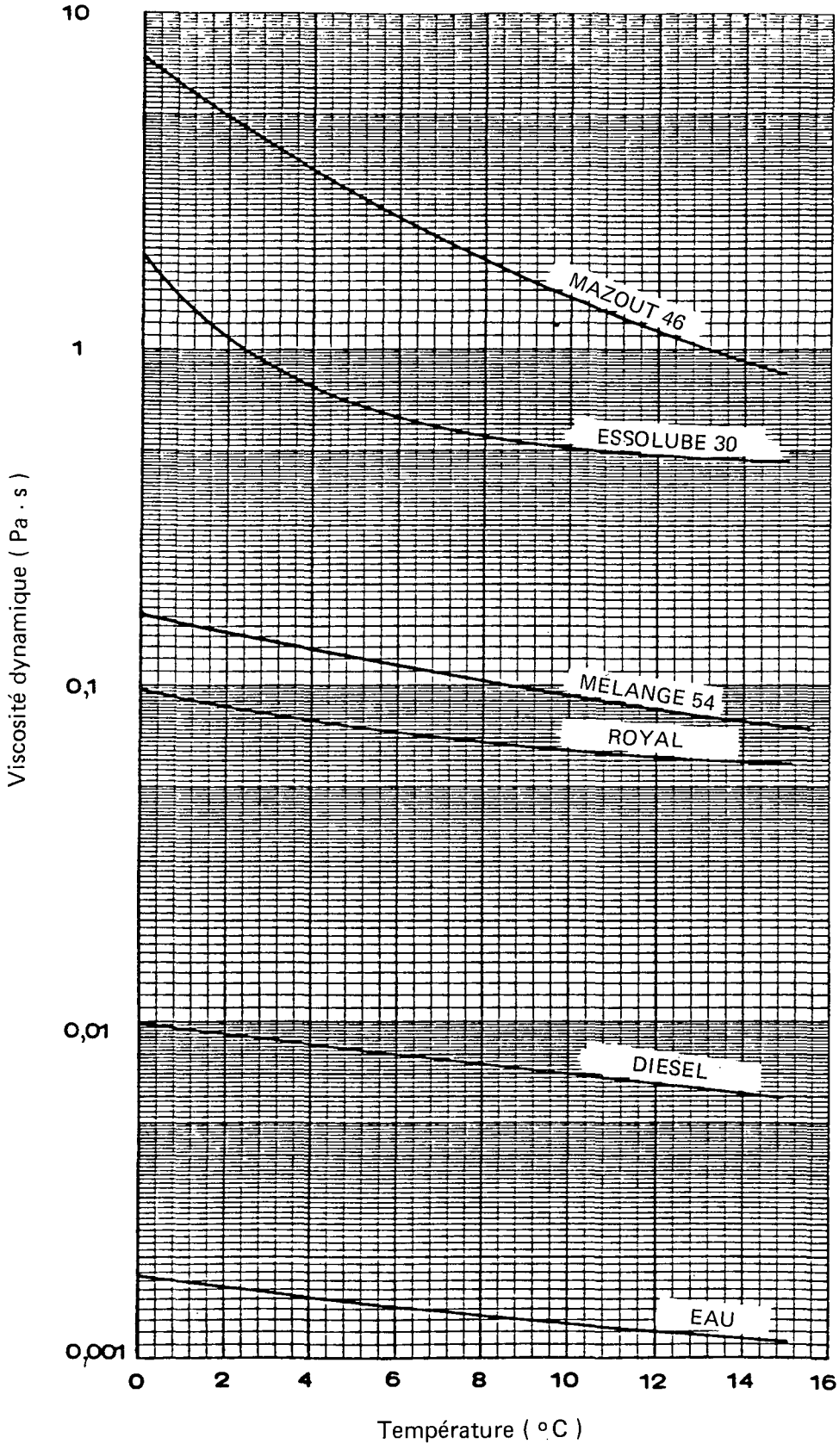


Figure 4 Viscosité dynamique des hydrocarbures et de l'eau

Analyses – troisième partie

Une analyse théorique a été effectuée sur les principes de base du processus de récupération des hydrocarbures. L'analyse a mené à une théorie de la couche limite et a servi à évaluer l'effet de la vitesse des tambours sur le taux de récupération des hydrocarbures.

Tableau 2
Programme des essais en canal

Série d'essais	Type d'hydrocarbure	Vitesse d'approche (m/s)	Paramètres des tambours: Vitesse de rotation (tr/min)	Paramètres des tambours: Profondeur d'immersion (cm)	But des essais
1	Diesel	0,23	5, 10, 13	11,4	Effet de la vitesse de rotation
2	Diesel	0,17	5, 10, 15	30,5	Effet de la profondeur d'immersion
3	Diesel	0,14	5	45,00	Effet de la profondeur d'immersion
4	Diesel	0,00	5, 10		Effet de la vitesse d'approche
5	Diesel	0,00	10		Effet de l'épaisseur de la couche
6	Mélange 54	0,17	5, 10, 15	30,5	Effet des propriétés des hydrocarbures

*

* *

4 MARCHE À SUIVRE PENDANT LES ESSAIS

4.1 Essais préparatoires

À l'aide d'un viscosimètre, on a analysé la viscosité et la densité à différentes températures, à partir de 0 °C de six hydrocarbures disponibles dans le commerce. Deux de ces hydrocarbures, le combustible diesel et le mélange d'hydrocarbures n° 54, mélange à 46 p. cent de combustible diesel et à 54 p. cent de combustible de soute "C", ont été retenus en raison de leur viscosité, de leur facilité de manutention et parce que ce sont les hydrocarbures les plus communs. Ces hydrocarbures ont été jugés représentatifs des hydrocarbures susceptibles d'être déversés dans l'Inlet Burrard et récupérés par le bâtiment prototype OSCAR.

On a étudié l'adhérence des hydrocarbures à cinq plaques d'acier ayant chacune un revêtement différent et mesurant 15 cm sur 15 cm sur 0,3 cm. Les différentes plaques mises à l'essai présentaient les surfaces suivantes: rouille légère, rouille moyenne, fini galvanisé, peinture au chromate de zinc, peinture au plomb rouge, aluminium et polypropylène. Les plaques ont été pesées à sec, puis complètement immergées à travers une couche de 2,5 cm de diesel flottant

dans un bain d'eau. Elles ont été retirées à la verticale en 2 secondes et mises à égoutter pendant 5 secondes. Elles ont été pesées de nouveau dans un baccollecteur, ce qui a permis d'évaluer la quantité d'hydrocarbure demeurée attachée à chaque plaque. Les résultats de ces essais sont donnés à la figure 5.

Un bref essai a été mené sur le mélange n° 46 dans le but de mesurer l'effet de l'épaisseur de la nappe de mazout sur la quantité récupérée par les plaques. La plaque d'acier légèrement rouillée a été plusieurs fois plongée dans le bain de mazout, pesée et nettoyée. La quantité de mazout recueillie à chaque reprise a été soustraite de la quantité flottant dans le bain, puis l'épaisseur de la nappe restante a été calculée de nouveau. Les résultats de cet essai sont donnés à la figure 6.

4.2 Essais en canal

Le chariot portant les tambours a été installé à l'abri devant une fenêtre d'observation pleine hauteur de 5 m de long pratiquée dans la paroi du canal. Ce dernier a été rempli d'eau de façon à baigner les parties inférieures des tambours; la pompe de circulation de l'eau a été mise en marche; pour créer un courant dans l'axe du canal, sous les tambours. Des hydrocarbures ont été versés à un rythme constant par la gouttière de distribution située à l'extrémité amont du canal et le courant les a transportés jusqu'aux tambours.

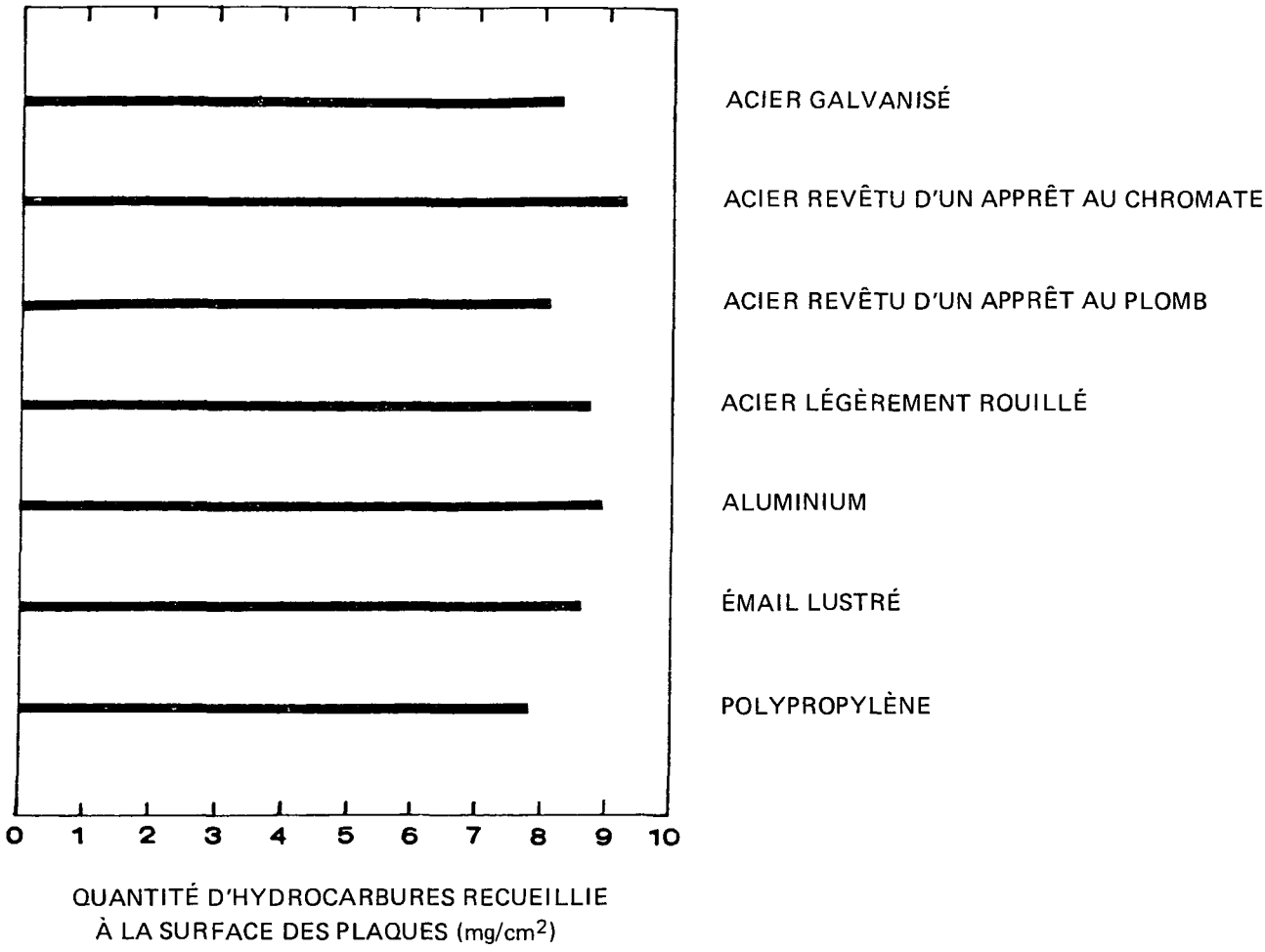
Les essais du prototype ont été effectués à des vitesses de rotation des tambours allant jusqu'à 60 tr/min; cependant, le Capitaine D. Sjoquist et d'autres personnes qui ont été témoins de tels essais ont noté dans leurs rapports un niveau excessif d'éclaboussement et de pulvérisation des hydrocarbures recueillis par les tambours à ces vitesses, et un niveau d'émulsification moindre des hydrocarbures et de l'eau à des vitesses plus faibles. On a fait varier la vitesse des tambours d'essai entre 5 tr/min et un maximum de 15 tr/min au moyen de la commande du moteur à vitesse variable. Des pertes de puissance dans le système de transmission ont empêché d'atteindre des vitesses supérieures à 15 tr/min. On a fait varier la profondeur d'immersion des tambours entre 11,5 et 45,0 cm en changeant le niveau d'eau dans le canal.

Les taux de récupération des hydrocarbures ont été évalués en mesurant le volume récupéré pendant une période donnée. Les pourcentages d'hydrocarbures et d'eau dans le fluide récupéré ont été appréciés visuellement à travers un panneau de matière plastique transparente disposé sur le côté du réservoir de mesure après que les échantillons aient égoutté pendant 10 min. La vitesse de la nappe d'hydrocarbures vers les tambours a été calculée en chronométrant le déplacement de repères sur une distance de 5 m en amont des tambours. L'épaisseur moyenne de la nappe a été calculée à partir de la quantité d'hydrocarbures déversés dans le canal et à partir de mesures du courant. L'épaississement de la nappe en amont des tambours a été observé par la fenêtre d'observation.

Les essais ont été enregistrés sur bande vidéo en noir et blanc, par la fenêtre d'observation; l'enregistrement décrit les processus d'émulsification et de brassage entre les tambours. Un schéma du processus d'écoulement est donné à la figure 7. Les résultats des essais sont donnés au tableau 3 et sont illustrés à la figure 8.

*

* *



Remarque: Les plaques d'essai ont été plongées dans une nappe de 2,5 cm de diesel.

Figure 5 Quantités d'hydrocarbures recueillies par différentes surfaces

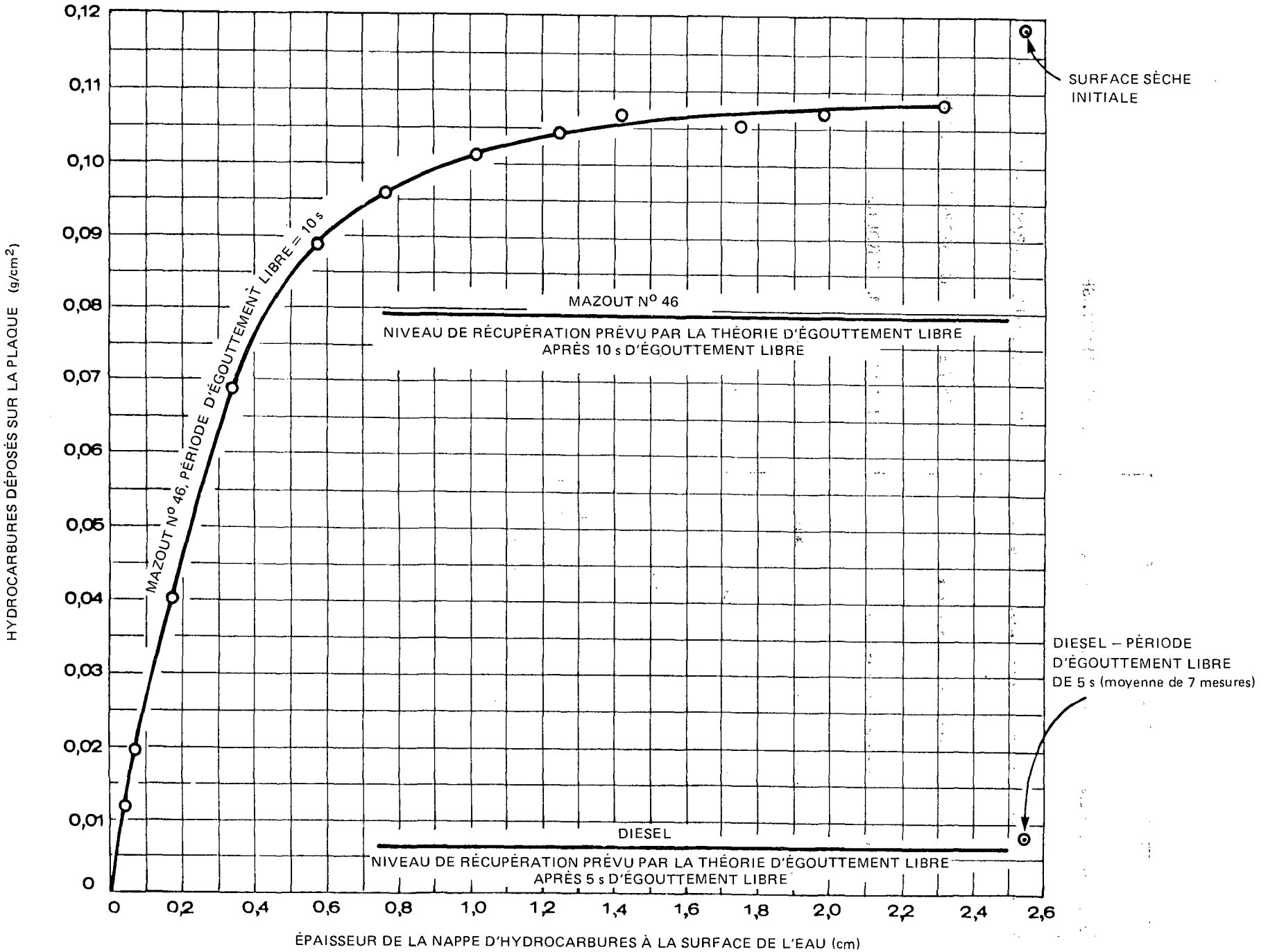


Figure 6 Quantité d'hydrocarbures récupérés en fonction de l'épaisseur de la nappe

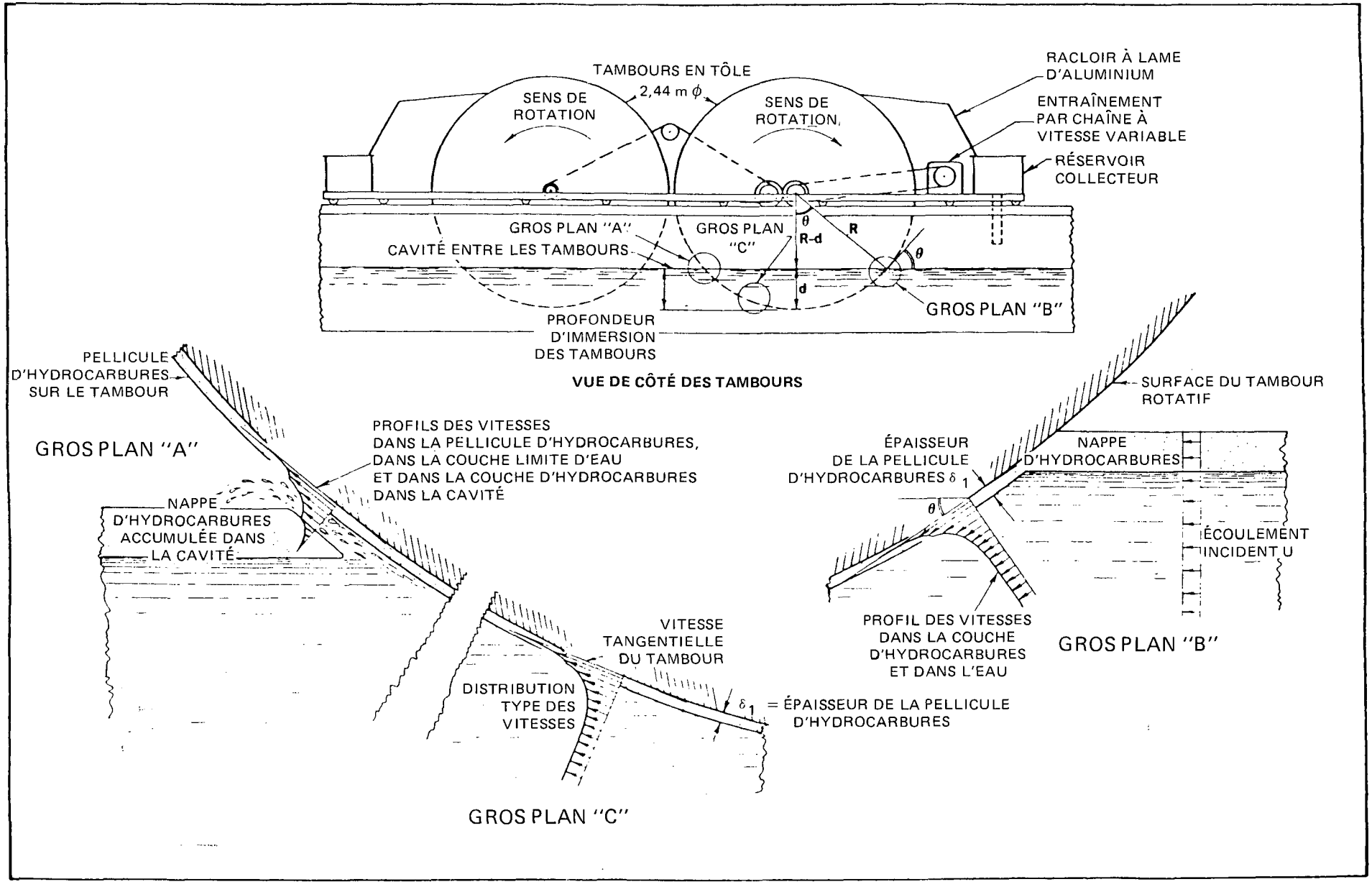
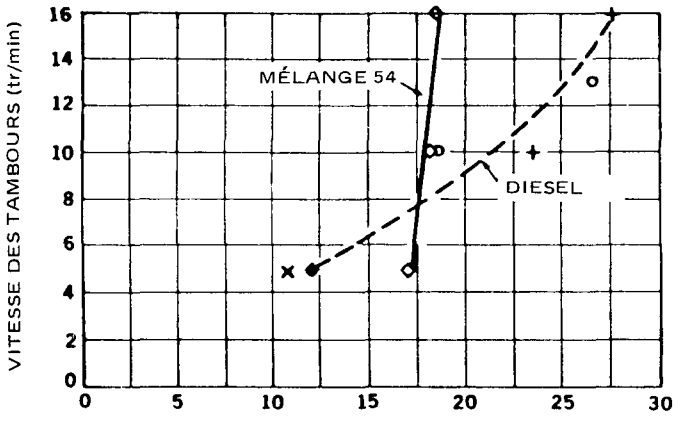
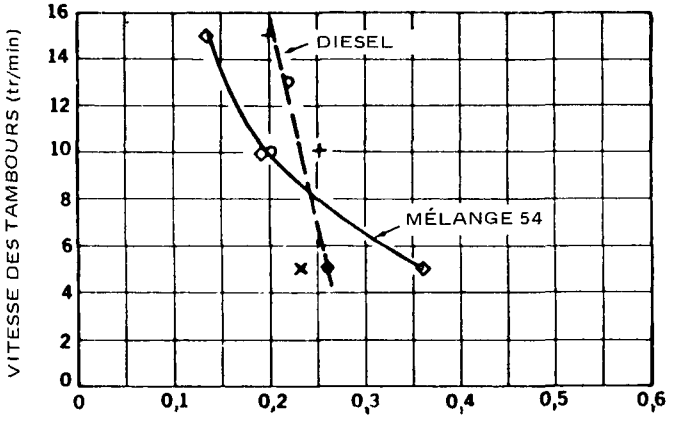


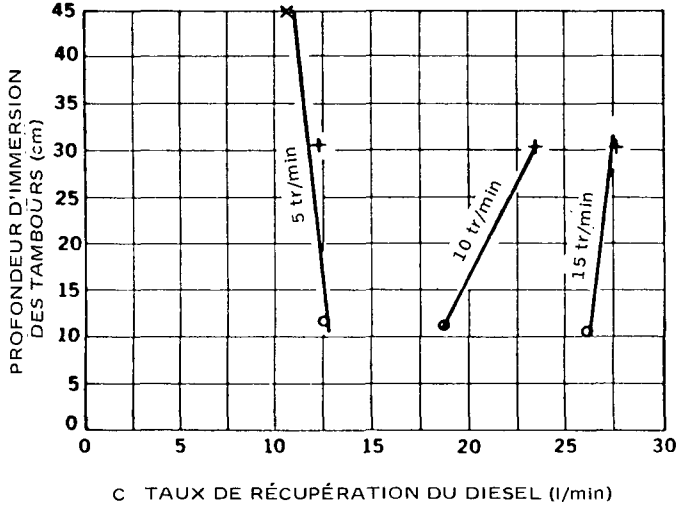
Figure 7 Schéma de la couche limite hydrocarbures-eau

Tableau 3
Résultats des essais en canal

Type d'hydro-carbures	Profondeur d'immersion (cm)	Espacement (cm)	Paramètres d'approche		Vitesse du tambour (tr/min)	Quantité d'hydrocarbures recueillie		Taux cumulatif de récupération (l/min)	Épaisseur moyenne de la pellicule d'hydrocarbure sur le tambour (cm)	Facteur de récupération des hydrocarbures %	Teneur en hydrocarbures %
			Vitesse (m/s)	Épaisseur de la nappe (cm)		Tambour d'amont (tr/min)	Tambour d'aval (l/min)				
Diesel	11,4	1,2	0,23	0,3	5	12,1	0,0	12,1	0,026	23	94
	11,4	1,2	0,23	0,3	10	18,3	0,4	18,7	0,020	42	79
	11,4	1,2	0,23	0,3	13	26,4	0,5	26,9	0,022	44	66
	30,5	1,6	11,7	0,2	5	11,6	0,5	12,1	0,026	39	88
	30,5	1,6	0,17	0,3	10	23,0	0,5	23,5	0,025	79	81
	30,5	1,6	0,17	0,3	15	27,5	0,1	27,6	0,020	70	67
	45,0	1,2	0,14	0,3	5	10,6	0,0	10,6	0,023	32	94
	30,5	1,6	0,00	0,3	5	8,2	6,3	14,5	0,031		
	30,5	1,6	0,00	0,6	10	3,3	2,1	5,4	0,008		
	30,5	1,6	0,00	0,3	10	2,0	1,3	3,3	0,004		
Mélange 54	30,5	1,2	0,17	0,2	5	17,0	0,0	17,0	0,036	82	96
	30,5	1,2	0,17	0,2	10	18,0	0,2	18,2	0,019	93	43
	30,5	1,2	0,17	0,2	15	17,1	0,7	17,8	0,013	90	19







NOTE:

Symbole	Hydrocarbure	Profondeur d'immersion des tambours
o	diesel	11,4 cm
+	diesel	30,5 cm
X	diesel	45,0 cm
◇	mélange 54	30,5 cm

Les résultats des essais sur le processus de récupération ne valent que pour le taux d'alimentation en hydrocarbures et l'épaisseur des nappes fixés pour ces essais. Les mesures prises lors de ces essais ne devraient par être utilisées pour prévoir numériquement les conditions lorsque les taux d'alimentation sont différents.

Figure 8 Effets des variations des paramètres de fonctionnement

5 RÉSULTATS DES ESSAIS

5.1 Essais préparatoires

Matériaux de la surface des tambours

La figure 5 montre qu'il existe peu de différence entre les différents pouvoirs de récupération de la surface des 7 plaques d'essai. La plaque d'acier revêtue de l'apprêt au chromate de zinc a le meilleur rendement, soit 9,1 mg/cm^2 de diesel. Il s'agit là d'une valeur supérieure d'environ 12 p. cent à la quantité recueillie par la surface d'acier légèrement rouillée.

On a constaté, avec le prototype OSCAR, que les revêtements de peinture sur la surface des tambours d'acier se détachent en cours de fonctionnement. Pour faciliter les essais et éviter de modifier les caractéristiques de la surface pendant les essais, on a choisi des surfaces de tambour en acier non peint qui, une fois enduites d'hydrocarbures résiduels, ont été peu attaquées par la rouille.

Effet de l'épaisseur de la nappe

Plusieurs essais consistant à retirer la plaque d'essai en métal non peint à travers une nappe de mazout n° 46 de plus en plus mince (figure 6) ont démontré que la quantité d'hydrocarbures recueillie par la plaque est toujours à peu près la même lorsque la nappe a une épaisseur de plus de 1,2 cm. En-deçà de cette épaisseur, la quantité recueillie sur chaque tambour diminue à mesure que l'épaisseur de la nappe est réduite. Lorsque la nappe est très mince, la plaque recueille tous les hydrocarbures.

Les résultats des essais indiquent que le taux de récupération, par OSCAR, d'hydrocarbures visqueux par adhérence peut diminuer sensiblement si des mesures ne sont pas prises pour éviter l'amincissement de la nappe d'hydrocarbures vers la fin de la période de nettoyage. La vitesse de rotation des tambours n'a pas un effet appréciable sur le taux de récupération dans ces conditions, puisque le tambour récupère les hydrocarbures plus rapidement qu'ils ne leur parviennent. La figure 6 montre que le taux de récupération maximal du mazout n° 46, par substance oléophile, ne peut être atteint à moins que l'épaisseur de la nappe ne soit maintenue à plus d'environ 1,2 cm.

Les taux de récupération mesurés avec le mazout n° 46 et le combustible diesel à l'aide de la plaque d'acier sont supérieurs d'environ 35 p. cent à ceux calculés à partir de la théorie d'égouttement libre (voir la figure 6).

5.2 Études en canal

Observations visuelles

Les fenêtres en matière plastique transparente, pratiquées dans la paroi du canal, ont permis d'observer le processus de récupération des hydrocarbures au-dessous de la surface du fluide. Le processus d'écoulement est décrit à la figure 8.

On a observé que la traînée exercée par le tambour induit un mouvement dans la pellicule d'hydrocarbures ainsi que dans la couche d'eau avoisinante. La pellicule d'hydrocarbures se détache par cisaillement de la nappe d'hydrocarbures en amont du premier tambour et est entraînée sous le tambour pour revenir à la surface du fluide dans la cavité entre les tambours. La couche d'eau entraînée, à l'extérieur de la pellicule d'hydrocarbures, est soulevée dans la cavité et empêche la nappe d'hydrocarbures flottant dans la cavité d'entrer en contact avec la surface du tambour.

Il y a émulsification à l'interface hydrocarbures-eau lorsque la vitesse des tambours dépasse 10 tr/min. À des vitesses supérieures à 10 tr/min, une turbulence considérable apparaît dans la cavité entre les deux tambours où il se forme une couche d'hydrocarbures et d'hydrocarbures émulsifiés d'une épaisseur allant jusqu'à 12 cm. Une mince couche d'hydrocarbures adhère aux tambours et est entraînée jusqu'au racloir. L'entraînement est assez rapide pour empêcher que les hydrocarbures ne redescendent le long du tambour sous forme d'écoulement en nappes.

Les hydrocarbures n'ont pas atteint le tambour d'aval, de sorte que seule une couche d'eau a été formée autour du tambour, puis jusque dans la cavité, empêchant ainsi les hydrocarbures flottant dans la cavité d'atteindre le second tambour. En conséquence, seule une quantité négligeable, voire nulle, d'hydrocarbures a été recueillie par le tambour d'aval. Le second tambour est toutefois relativement utile, car il réduit le nombre de gouttelettes d'hydrocarbure entraînées de la cavité entre les tambours vers la zone aval.

Dans les essais à vitesse d'approche nulle dans le canal, on a observé que le tambour d'aval recueille à peu près la même quantité d'hydrocarbures que le tambour d'amont.

On a observé un retour d'hydrocarbures entre le tambour et la fenêtre d'observation, ce qui indique que le niveau dans la cavité est supérieur au niveau en amont et en aval. La différence de niveau provient de la différence de densité entre d'une part l'eau, et d'autre part les hydrocarbures et la couche d'émulsion dans la cavité. Une différence maximale de 0,6 cm a été relevée entre le niveau dans la cavité et celui en amont des tambours pendant les essais à une vitesse des tambours de 10 tr/min et à une vitesse d'approche nulle.

La variation de l'espacement des tambours n'a pas d'effets notables sur le processus de récupération des hydrocarbures.

Mesures effectuées lors des essais sur les tambours en mouvement de rotation

Les résultats des essais montrent, au tableau 3, que le tambour d'aval ne recueille qu'une quantité négligeable d'hydrocarbures lorsqu'on établit un courant dans le canal pour simuler le remorquage. Lorsque le courant est nul dans le canal, les deux tambours recueillent des quantités sensiblement égales d'hydrocarbures. Ces observations tendent à confirmer que le mélange hydrocarbures-émulsion recueilli dans la cavité est isolé des surfaces des tambours par les couches limites d'eau entourant les tambours. Seuls les hydrocarbures flottant à l'avant d'un tambour en rotation peuvent être recueillis.

Les résultats des essais de la figure 8 montrent que le taux de récupération du combustible diesel augmente en fonction de la vitesse des tambours tandis que celui du mélange n° 54 demeure relativement constant (voir la figure 8a). Le calcul de l'épaisseur moyenne du film d'hydrocarbures au sommet des tambours, établi d'après des mesures du taux de récupération et de la vitesse des tambours, montre que l'épaisseur de la pellicule de combustible diesel diminue en fonction de la vitesse des tambours (voir la figure 8b). Cela indique que l'épaisseur de la pellicule de combustible diesel utilisé dans les essais est trop faible pour assurer une alimentation suffisante des tambours en hydrocarbures. Un taux d'alimentation supérieur aurait produit une couche plus épaisse en amont et, partant, aurait entraîné de plus forts taux de récupération à des vitesses de rotation des tambours plus élevées.

En raison de sa viscosité élevée, le mélange n° 54 a été versé dans le canal à un rythme plus lent de façon à former une nappe uniforme à la surface de l'eau. Le mélange se déplace dans le canal, par flaques et occupe environ 50 p. cent de la surface de l'eau. Le taux d'alimentation est inférieur au taux maximal de récupération du tambour. L'amincissement de la couche d'hydrocarbures en fonction de la vitesse des tambours était plus marqué dans le cas du mélange n° 54 que dans celui du diesel, mais il était dû également au faible taux d'alimentation.

Les taux de récupération du combustible diesel réalisés par les tambours varient entre 10 et 28 l/min en présence d'un courant d'approche; ils varient entre 3 et 15 l/min en l'absence de courant d'approche dans le canal. Le mélange n° 54 a été récupéré à un taux compris entre 17 et 19 l/min. Ces taux sont de beaucoup supérieurs au taux de 9 l/min de combustible diesel marin léger recueilli par le tambour de 1,22 m de longueur du prototype OSCAR au cours d'opérations de nettoyage dans le port de Vancouver (1975). On considère toutefois que ces taux de récupération pourraient être accrus si l'alimentation des tambours en hydrocarbures était suffisante.

Le taux de récupération des hydrocarbures ne varie pas sensiblement en fonction de la profondeur d'immersion des tambours (voir figure 8c). En outre, il n'y a aucune relation entre la profondeur d'immersion et l'épaisseur de la couche d'hydrocarbures à la hauteur du racloir. Lorsqu'il y a pompage, la prodondeur d'immersion a, sur la récupération, un effet plus marqué que l'adhérence aux tambours d'acier, due à ses propriétés oléophiles. Les résultats indiquent toutefois que le pompage *ne joue pas* un rôle déterminant dans le processus de récupération.

Le facteur de récupération d'hydrocarbures est défini comme le pourcentage d'hydrocarbures recueillis par rapport à la quantité récupérable pendant une période d'essai. Au cours des essais de simulation du déplacement du bâtiment par un courant en canal, les tambours ont recueilli entre 23 p. cent et 79 p. cent du combustible diesel. Le plus fort pourcentage de récupération a été réalisé à une profondeur d'immersion de 30,5 cm et à une vitesse de rotation de 10 tr/min. Le taux de récupération du mélange n° 54 se situe aux environs de 90 p. cent, avec un maximum de 93 p. cent enregistré à 10 tr/min.

5.3 Effet des dimensions des tambours

L'effet des dimensions des tambours sur le taux de récupération des hydrocarbures a fait l'objet d'une étude théorique. Des recherches ont été effectuées sur l'effet de tambours de différents diamètres sur le taux de récupération; en supposant que la vitesse tangentielle des tambours est constante de sorte que leur vitesse de rotation soit fonction inverse du diamètre du tambour.

L'effet des différentes dimensions de tambour sur l'adhérence par substance oléophile et sur le pompage éventuel des couches d'hydrocarbure et d'eau à proximité des tambours a été étudié. Le taux de récupération par substance oléophile ne semble pas varier sensiblement en fonction du diamètre des tambours, dans la mesure où la vitesse tangentielle du tambour à sa sortie de l'eau reste constante. Cette théorie est confirmée par les résultats des essais en canal qui démontrent que la profondeur d'immersion des tambours et, partant, l'inclinaison de la surface des tambours à leur sortie du fluide, ainsi que la hauteur à laquelle les hydrocarbures doivent être entraînés, ont peu d'effets sur le taux de récupération. D'autres facteurs influant sur le taux de récupération par substance oléophile, tels que l'adhérence des hydrocarbures au tambour, ne semblent pas, selon toute vraisemblance, varier sensiblement avec la courbure de la surface des tambours.

La relation entre les dimensions des tambours et les quatre grands facteurs régissant l'action de pompage exercée par les tambours à surface lisse a été étudiée. Ces facteurs sont:

1. L'énergie impartie au fluide par le tambour. On a établi empiriquement que l'énergie transmise par rotation mécanique au fluide environnant varie en fonction de $D^4.n^3$; D étant le diamètre et n la vitesse de rotation.

2. La quantité de mouvement du fluide pompé à la surface qui varierait en fonction de $D^2.n^2$.

3. La force centrifuge qui détache le fluide du tambour et qui varie en fonction de $D.n^2$.

4. La pression différentielle exercée par l'air à travers la couche de fluide qui sert à faire adhérer le fluide au tambour et qui varie en fonction de $D^2.n^2$.

Pour augmenter l'action de pompage des tambours, il faut maximiser les points 1, 2 et 4 ci-dessus, et minimiser le point 3. À une vitesse tangentielle constante des tambours, l'objectif ne peut être atteint qu'en augmentant le diamètre des tambours D et en réduisant la vitesse de rotation n. En conclusion, quel que soit l'effet de pompage possible, on constate que le taux de récupération d'un petit tambour tournant à une vitesse élevée est inférieur à celui du tambour de 2,44 m de diamètre.

*

* *

6 MODÈLE ANALYTIQUE DU PROCESSUS DE RÉCUPÉRATION

6.1 Paramètres importants dans le processus d'OSCAR

Les essais ont révélé que des tambours tournant en sens opposés ne permettent pas de réaliser l'effet de pompage prévu. Ils révèlent en outre que la profondeur d'immersion et l'espacement des tambours influent peu sur le taux de récupération.

On a établi que la vitesse des tambours est un facteur important quant à la quantité et, dans une mesure encore plus grande, quant à la qualité des hydrocarbures recueillis. À des vitesses de rotation élevées, les hydrocarbures s'émulsifient.

La viscosité des hydrocarbures est aussi un facteur important, comme le dénote l'épaisseur relative des pellicules d'hydrocarbures sur une plaque verticale qu'on retire d'une nappe d'hydrocarbures de 2,5 cm d'épaisseur flottant sur l'eau.

L'épaisseur de la pellicule sur une plaque est prévue par les théories du retrait et de l'égouttement de Tallmadge et Gutfinger, (1976). Ces théories sont résumées à l'Annexe I. Les taux de récupération mesurés du combustible diesel et du mélange n° 46 sont supérieurs d'environ 35 p. cent à ceux calculés à partir de cette théorie analytique (voir la figure 6). En outre, les essais sur des plaques verticales ont montré que l'épaisseur de la pellicule d'hydrocarbures sur la plaque est fonction de l'épaisseur de la nappe d'hydrocarbures, du moins pour les nappes relativement minces. Les théories du retrait et de l'égouttement ne peuvent expliquer les variations d'épaisseur des nappes d'hydrocarbures.

La mise au point d'un modèle mathématique du processus d'adhérence par substance oléophile a été entreprise malgré le manque de données scientifiques sur les prorpiétés physiques des interfaces hydrocarbure-eau et des émulsions hydrocarbure-eau.

6.2 Modèle analytique

Études qualitatives des processus de formation des couches limites

Dans les études en canal, les deux tambours se sont recouverts de couches limites hydrocarbure-eau provenant d'une séparation incomplète entre la nappe flottante d'hydrocarbures et l'eau, dans la cavité. Le schéma de la figure 7 illustre le processus d'écoulement au voisinage de la cavité et montre qu'une mince couche d'hydrocarbures recouvre la surface des tambours. À la couche d'hydrocarbures adhère une couche limite d'eau dont la quantité de mouvement est assez grande pour empêcher la nappe flottante d'hydrocarbures dans la cavité d'atteindre la surface du tambour. Par conséquent, les tambours ne peuvent recueillir les hydrocarbures dans cette cavité.

À mesure qu'augmente la vitesse de rotation des tambours, l'écoulement devient turbulent, ce qui s'explique soit par une instabilité centrifuge dans la couche limite d'hydrocarbures ou d'eau, soit par une instabilité de l'interface hydrocarbure-eau due à la formation d'ondes de Kelvin-Helmholtz.

Les conditions d'instabilité centrifuge dans des écoulements visqueux sont décrites par Tallmadge et Gutfinger (1967). Pour faire intervenir ces conditions dans l'étude, il faut toutefois, connaître le profil radial des vitesses dans la couche limite. Un profil approximatif a été établi à partir d'un modèle de récupération de la couche limite conçu pour OSCAR.

Les ondes de Kelvin-Helmholtz au niveau de l'interface hydrocarbure-eau ont été analysées et décrites par Milgram et Van Houten (1978) en termes de vitesses interfaciales et de coefficients de résistance. Ils ont démontré expérimentalement que des ondes interfaciales se développent à des vitesses interfaciales d'environ 25 cm/s entre le combustible diesel et une surface d'eau. Ils ont aussi démontré que la destruction des ondes de Kelvin-Helmholtz à des vitesses interfaciales plus élevées, d'environ 45 cm/s, est liée à la formation de gouttelettes et d'émulsions d'hydrocarbures. Milgram et Van Houten ont en outre démontré que la formation de gouttelettes est plus marquée lorsque la couche limite d'hydrocarbures est mince.

Analyse de la formation de la couche limite d'hydrocarbure

Les hydrocarbures recueillis par le racloir du tambour d'amont proviennent de la nappe d'hydrocarbures flottant à la surface amont. L'épaisseur de la pellicule est déterminée par l'équilibre entre les forces de cisaillement et les forces de pression, les forces centrifuges et les ondes de Kelvin-Helmholtz devenant importantes à des vitesses de rotation élevées. Un modèle qui tient compte uniquement des forces de cisaillement, des forces hydrostatiques et des forces de pression a été schématisé à la figure 7. On suppose que ce modèle est fidèle dans les conditions des essais jusqu'à ce que soient atteintes les vitesses de rotation auxquelles apparaissent des instabilités centrifuges ou de Kelvin-Helmholtz. Le modèle n'est pas valable pour décrire le processus de récupération des hydrocarbures par le tambour d'aval puisque la couche limite d'eau isole les hydrocarbures du tambour dans la cavité entre les tambours. Le modèle est décrit à l'Annexe II.

Cette décharge dans la couche limite d'hydrocarbures peut être calculée seulement si la contrainte de cisaillement à la surface du tambour (τ_0) et l'épaisseur de la couche limite (σ_1) peuvent être évaluées en fonction de la distance du bord d'attaque. D'après les résultats expérimentaux analysés par Tallmadge et Gutfinger (1967), l'épaisseur d'hydrocarbures ne varie pas beaucoup en fonction de la distance du bord d'attaque, à moins qu'il n'y ait turbulence. En outre, l'épaisseur de la couche peut être évaluée de façon approximative à l'aide des théories du retrait de plaques dans des bains de liquide (voir l'Annexe I).

6.3 Couche limite d'eau

L'équation (4), (voir l'Annexe II pour les équations 1-7), relie la contrainte de cisaillement dans la couche d'hydrocarbures à la surface des tambours, à la même contrainte à l'interface hydrocarbures-eau (τ_1). Cette dernière contrainte peut être évaluée en appliquant l'intégrale de la quantité de mouvement de Karman à un volume témoin limité par l'interface hydrocarbures-eau. Dans cette évaluation de la contrainte, on suppose aussi que les profils de vitesses dans la couche limite d'eau adjacente à la pellicule d'hydrocarbures ont la même forme en aval. Le calcul de l'intégrale susmentionnée, appliquée à la couche limite d'eau, est présenté à l'Annexe III. À partir d'un profil de vitesses arbitraires dans la couche limite d'eau, on peut calculer la valeur recherchée de la contrainte de cisaillement (τ_i) à l'interface hydrocarbures-eau, ainsi que la quantité d'hydrocarbures rejetés en utilisant l'équation (6).

6.4 Champ d'application du modèle de la couche limite

Comme le modèle de la couche limite repose sur l'hypothèse selon laquelle un écoulement laminaire existe à la fois dans la couche d'hydrocarbures et dans la couche d'eau, son champ d'application se limite aux cas où les nombres de Reynolds pour les couches d'hydrocarbures et d'eau, tels que définis par l'équation (7), ne sont pas supérieurs à environ 5×10^5. Cette condition restreint l'utilisation du modèle analytique à des vitesses de rotation maximales comprises entre 5 et 10 tr/min pour un tambour de 2,44 m de diamètre, immergé à une profondeur de 30,5 cm. Les tambours plus petits ou les tambours moins immergés présentent des surfaces mouillées plus faibles; ainsi, le nombre de Reynolds est plus petit, et la turbulence est retardée. Le modèle analytique est donc applicable aux situations où la vitesse est élevée.

Une vitesse élevée de rotation du tambour favorise la turbulence ainsi que des instabilités, à l'interface hydrocarbures-eau, qui mènent à la formation de gouttelettes d'hydrocarbures et leur entraînement dans le courant d'eau libre. Un modèle analytique de ce dernier processus n'a pas été mis au point dans le cadre de ce projet.

6.5 Comparaison des taux de récupération prévu et réel

Les taux de récupération du combustible diesel et du mélange n° 54 ont été mesurés à des vitesses de rotation des tambours de 5, 10 et 15 tr/min, à une vitesse d'approche du courant de 0,17 m/s et à une profondeur d'immersion des tambours de 30,5 cm (voir tableau 3). Les propriétés des fluides et les variables de fonctionnement ont été choisies de façon à correspondre aux conditions des essais ci-dessus. Des valeurs prévues ont été établies pour les nombres de Reynolds dans la couche limite d'eau, pour l'épaisseur de la couche limite d'hydrocarbures dans la zone d'écoulement laminaire et pour la quantité théorique d'hydrocarbures rejetés, donnée par le modèle. Ces valeurs sont comparées aux résultats des essais dans le tableau 4.

Les nombres de Reynolds de la couche d'eau, au tableau 4, indiquent que de la turbulence s'établit à une vitesse de rotation des tambours d'environ 5 tr/min. Les résultats des essais montrent qu'il y a émulsification à la fois du combustible diesel et du mélange n° 54 à une vitesse de rotation des tambours de 10 tr/min. Il semble donc que la turbulence dans la couche limite d'eau favorise l'entraînement des hydrocarbures dans l'eau. La présence d'ondes de Kelvin-Helmholtz à l'interface n'a pas pu être vérifiée.

Tableau 4
Comparaison des taux de récupération prévu et observé (profondeur d'immersion: 30,5)

						Couche limite d'eau		Couche limite d'hydrocarbures combustible diesel			Couche limite d'hydrocarbures mélange n° 54		
tr/min	Distance du bord d'attaque s_m	Angle θ degrés	Vitesse tangentielle du tambour V_t m/s	Vitesse du courant libre U m/s	Vitesse réelle du courant libre U_e m/s	Nombre de Reynolds $\times 10^5$	Épaisseur de la C.L. mm	Épaisseur de la pellicule d'hydrocarbures mm	Taux de récupération théorique l/min	Taux de récupération expérimental l/min	Épaisseur de la pellicule d'hydrocarbures mm	Taux de récupération théorique l/min	Taux de récupération expérimental l/min
5	0	41,4	0,64	0,17	0,47	0	0	0,29	13,5	11,6	1,78	83,0	17,0
	0,30	27,12				1,03	5,7						
	0,60	12,8				2,06	8,1						
	0,90	-1,6				3,09	9,9						
	1,20	-15,9				4,11	11,5						
	1,50	-30,2				5,15	12,8						
	1,76	-41,4				5,95	13,8						
10	0	41,4	1,28	0,17	1,11	0	0	0,45	42,0	23,0	2,63	246,0	18,0
	0,30	27,1				2,05	4,1						
	0,60	12,8				4,12	5,7						
	0,90	-1,6				6,17							
	1,20	-15,9				8,23							
	1,50	-30,2				10,30							
	1,76	-41,4				11,90							
15	0	41,4	1,92	0,17	1,75	0	0	0,59	82,7	27,5	3,32	465,1	17,1
	0,30	27,1				3,08	3,3						
	0,60	12,8				6,18							
	0,90	-1,6				9,26							
	1,20	-15,9				12,34							
	1,50	-30,2				15,45							
	1,76	-41,4				17,85							

Selon le modèle mathématique, on a prévu un taux de récupération du combustible diesel de 13,5 l/min, à une vitesse de rotation des tambours de l'installation d'essai de 5 tr/min. Ce chiffre s'écarte de 16 p. cent du taux de récupération de 11,6 l/min mesuré en canal. À mesure qu'on augmente la vitesse de rotation des tambours, de la turbulence se manifeste et la pellicule d'hydrocarbures est réduite par entraînement. Le taux de récupération prévu des hydrocarbures est de beaucoup supérieur au taux observé.

L'amincissement calculé de la couche de combustible diesel sur le tambour expérimental, en fonction de la vitesse du tambour, montre que l'alimentation en hydrocarbures est insuffisante pour réaliser le taux de récupération maximal qu'il est en principe possible d'atteindre avec l'installation d'essai (voir la figure 8). Cet amincissement a aussi favorisé l'écart grandissant entre les taux théorique et expérimental de récupération, donnés au tableau 4, à mesure que la vitesse des tambours augmente. L'accord entre les résultats prévus et les résultats expérimentaux, à faible vitesse de rotation des tambours, indique que le processus de récupération dans des conditions d'écoulement laminaire est bien décrit par le modèle mathématique.

Le taux de récupération prévu de 83,0 l/min, pour le mélange n° 54, est près de 5 fois supérieur au taux observé expérimentalement, même à basse vitesse de rotation. Ce résultat s'explique en grande partie par la faible alimentation en mélange n° 54, dans le canal, pendant les essais. La capacité de récupération du tambour est supérieure au débit d'alimentation.

*

* *

7 LIGNES DIRECTRICES POUR LE FONCTIONNEMENT D'OSCAR

Des études expérimentales et mathématiques démontrent que le pompage du fluide en surface concourt peu au taux de récupération des tambours tournant en sens opposés. Des études mathématiques montrent que des taux de récupération optimaux, accompagnés d'un minimum d'émulsification des hydrocarbures dans l'eau, pourraient être réalisés par les tambours, si le nombre de Reynolds de la couche limite d'eau qui se forme à la surface de la pellicule d'hydrocarbures recouvrant le tambour était maintenu au-dessous de 5×10^5. Les études mathématiques montrent également que si l'épaisseur de la couche d'hydrocarbures à l'avant du tambour était suffisante pour alimenter ce dernier à son taux de récupération, on pourrait augmenter l'épaisseur de la couche d'hydrocarbure récupérée par le tambour en augmentant sa vitesse de rotation.

Les lignes directrices suivantes, quant au fonctionnement du prototype OSCAR, découlent de ces conclusions et des observations expérimentales:

1. L'espacement des tambours n'est pas déterminant dans le processus de récupération, mais il devrait être suffisant pour empêcher tout contact entre les pellicules d'hydrocarbures récupérés par chaque tambour. Un espacement de 1 cm ou plus serait suffisant pour la plupart des hydrocarbures légers et moyens.

2. L'effet le plus marqué de la profondeur d'immersion des tambours est d'augmenter la surface du tambour en contact avec l'eau, ce qui limite la vitesse maximale à laquelle

le tambour peut tourner sans produire une couche limite turbulente. La moindre vague (onde) aurait comme effet de "laver" la couche d'hydrocarbures sur le tambour et de faire varier continuellement la surface du tambour en contact avec l'eau. Lorsque les vagues sont petites, on peut minimiser leurs effets les plus nuisibles en immergeant les tambours à une profondeur égale ou supérieure à 36 cm, ce qui correspond à des angles d'entrée et de sortie entre la surface du tambour et la surface de l'eau de 45 degrés ou plus. En eau calme, la profondeur d'immersion peut être réduite, ce qui permet d'augmenter la vitesse de rotation des tambours et le taux de récupération.

3. Les tambours devraient tourner à des vitesses d'environ 5 tr/min lorsqu'on cherche à récupérer de minces nappes d'hydrocarbures ou lorsque la profondeur d'immersion est supérieure à 30 cm. Cela permet de minimiser l'émulsification et le rejet de gouttelettes d'hydrocarbures à l'arrière des tambours. La vitesse des tambours qui permet d'obtenir un taux de récupération maximal, sans égard aux facteurs de récupération des hydrocarbures, n'a pas été établie, mais on pourrait la régler jusqu'à 30 tr/min pour les hydrocarbures léger. À cette vitesse de rotation, il faudrait que la profondeur d'immersion soit inférieure à 4 cm pour obtenir un nombre de Reynolds inférieur à 5×10^5 dans la couche limite d'eau lorsque l'épaisseur de la nappe est supérieure à 1 cm.

4. La vitesse de propulsion du bâtiment dépend de l'épaisseur de la nappe d'hydrocarbures. Une vitesse inférieure à 0,2 m/s est recommandée pour des nappes d'épaisseur supérieure à 1 cm. Une telle vitesse minimise l'accumulation d'hydrocarbures entre les tambours et réduit la quantité d'hydrocarbures non récupérée, c'est-à-dire celle qui passe sous le bâtiment. Pour des nappes d'épaisseur inférieure à 1 cm, la vitesse du bâtiment devrait être accrue suffisamment pour permettre une certaine accumulation d'hydrocarbures à l'avant du tambour d'amont, ainsi qu'une alimentation continue suffisante.

L'étude du prototype OSCAR a montré que l'installation en surface d'une barrière, à l'aval des tambours, pour retenir les hydrocarbures qui n'ont pas été recueillis sous les tambours, est une condition essentielle à un bon fonctionnement. Les observations effectuées lors des essais confirment la nécessité d'une telle barrière en aval. Cette dernière pourrait être intégrée à l'écumoire. Il faudrait aussi étudier la pose d'un boyau relié à une pompe aspirante pour recueillir dans les coques de stockage les émulsions d'hydrocarbures qui s'accumulent entre les tambours, lorsqu'on veut récupérer des hydrocarbures légers. Une autre solution consisterait à détacher par raclage la couche limite d'eau recouvrant le tambour d'aval et "d'absorber" les hydrocarbures émulsifiés recouvrant ce même tambour au moyen d'un feutre ou d'un rouleau de mousse.

RÉFÉRENCES

Milgram, J.H. et R.J. Van Houten, «Mechanics of a Restrained Layer of Floating Oil above a Water Current», *J. Hydronautics, 12* (3), (juillet 1978).

Morris Industries, communication personnelle.

Rosenhead, L. *Laminar Boundary Layers*, Oxford, Clarendon Press, (1963).

Schlichting, H. *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York, (1955).

Solsberg, L.B., et coll., «Field Evaluation of Seven Oil Spill Recovery Devices», Service de la protection de l'Environnement, Environnement Canada, rapport n° EPS 4-EC-76-3, (août 1976).

Tallmadge, J.A., et C. Gutfinger, «Entrainment of Liquid Films – Drainage, Withdrawal and Removal», *J. Industrial and Engineering Chemistry*, 5 p (11), (novembre 1967).

Unno, H. et Inoue, I. «Initial Behaviour of Oil Slicks», *J. Chem. Eng. of Japan*, 11(1), (1978).

Annexe I

ENTRAÎNEMENT DES PELLICULES LIQUIDES

ENTRAÎNEMENT DES PELLICULES LIQUIDES

Il est important de connaître la dynamique des pellicules liquides par rapport à des objets solides, dans différents domaines tels que les revêtements, l'égouttement et la lubrification. Tallmadge et Gutfinger (1967) ont résumé les théories existantes, et proposé des équations théoriques simplifiées pour les processus de retrait, d'enlèvement et d'égouttement.

Les forces dominantes dans ces processus sont la force de viscosité, la force de la pesanteur et la tension superficielle à l'interface. Les forces d'inertie et d'accélération peuvent aussi être importantes.

Retrait:

Soit une pellicule liquide sur une plaque verticale qu'on retire d'un bain de liquide. Les équations de Navier-Stokes pour un flux constant et une épaisseur constante de la pellicule se ramènent à:

$$\mu \frac{d^2u}{dy^2} - \rho g = 0 \tag{1}$$

où la coordonnée z est parallèle à la plaque et y est perpendiculaire à la plaque. Si l'on suppose qu'il n'y a aucun glissement à la surface de la plaque et aucun cisaillement à l'interface liquide-air, on obtient le profil de vitesses suivant:

$$\frac{u}{U} = 1 - \frac{\rho g h_o^2}{2\mu U} \left(\frac{y}{h_o}\right)\left(2 - \frac{y}{h_o}\right) \tag{2}$$

où

- u = vitesse du liquide dans la pellicule
- U = vitesse de la plaque;
- ρ = masse volumique du liquide;
- g = constante d'accélération due à la pesanteur;
- μ = viscosité du liquide; et
- h_o = épaisseur constante de la pellicule.

Le flux est donné par l'intégrale de l'épaisseur de la pellicule:

$$\frac{q}{U} = \int_o^{h_o} \frac{u}{U} = h_o \frac{\rho g h_o^3}{3\mu U} \tag{3}$$

Dans le processus de retrait, le flux est inconnu et il faut évaluer l'épaisseur de la pellicule pour calculer le flux dans le retrait de flux constant. Il a été établi que la théorie est en accord avec les résultats expérimentaux lorsque l'épaisseur de la pellicule est calculée à partir d'une condition selon laquelle le ménisque est statique à la limite. Cette condition mène à la théorie du retrait corrigée pour les basses vitesses et à la théorie corrigée pour la gravité; cette dernière étant plus générale.

La démarche repose sur une division arbitraire de la pellicule liquide en trois régions:

1. la région d'épaisseur constante au-dessus du bain de liquide;
2. la partie dynamique du ménisque adjacente à la pellicule liquide;
3. la partie statique du ménisque près de la surface libre.

Les hypothèses posées sont:

a. Les courbes des ménisques des régions 2 et 3 sont continues.
b. Le ménisque de la région 3 est supposé statique (terme de viscosité négligeable).
c. Le ménisque de la région 2 est défini à partir d'un écoulement unidimentionnel, sans tenir compte de l'effet de l'écoulement sur la variation de la pression à l'interface et du gradient d'épaisseur de la pellicule.

D'après ces hypothèses, les équations de Navier-Stokes, pour la région 2, se ramènent à:

$$\sigma \frac{d^3h}{dz^3} + \frac{\mu d^2u}{dy^2} - \rho g = 0 \tag{4}$$

où σ = tension superficielle avec les dimensions d'une force par unité de longueur. On fait égaler la courbure définie par cette équation à la courbure du ménisque statique pour obtenir l'épaisseur suivante:

$$h_o \left(\frac{\rho g}{\sigma}\right)^{0.5} = 0.944 \left(\frac{\mu U}{\sigma}\right)^{0.66} \left[1 - \frac{h_o^2 \rho g}{\mu U}\right]^{0.66} \tag{5}$$

L'équation (5) est le fondement de la théorie du retrait corrigée pour la gravité.

Si l'équation (5) est exprimée en termes des deux nombres sans dimensions suivants:

$$\frac{\text{force de viscosité}}{\text{tension superficielle}} = C_a = \frac{\mu U}{\sigma} \qquad \text{(nombre capillaire)}$$

$$\frac{\text{force de pesanteur}}{\text{force de viscosité}} = T_o = h_o\left(\frac{\rho g}{\mu U}\right)^{0.5}$$

on obtient:

$$\frac{T_o}{\left[1-T_o^2\right]^{0.67}} = 0.944\ C_a^{\ 0.17} \tag{6}$$

Égouttement:

Lorsqu'on retire un objet d'un bain de liquide, on peut supposer qu'un égouttement libre commence. Si l'on suppose que l'écoulement est si lent que seules les forces de viscosité et de la pesanteur sont importantes, on peut démontrer que le flux de la pellicule liquide est:

$$q = \frac{\rho g h^3}{\mu} \tag{7}$$

L'équation de continuité de la pellicule est:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = - \frac{\partial h}{\partial t} \tag{8}$$

Ces équations, ajoutées à la condition à la limite supérieure voulant que l'épaisseur de la pellicule soit nulle (h = o à z = o) mènent à l'équation de prévision de l'égouttement libre:

$$h^2 = \frac{\mu z}{\rho g t} \tag{9}$$

Le terme d'accélération $\rho \frac{\partial u}{\partial t}$ augmente de moins de 1 p. cent la précision de l'équation du mouvement de la théorie de l'égouttement libre.

Annexe II

THÉORIE DE LA COUCHE LIMITE D'HYDROCARBURES

THÉORIE DE LA COUCHE LIMITE D'HYDROCARBURES

On peut exprimer, en régime permanent, l'équilibre des forces qui s'exercent sur le volume élémentaire de fluide dans la couche limite d'hydrocarbures recouvrant le tambour d'amont (voir figure 9). Les forces par unité de largeur sont:

$$P\,dy - \left(P + \frac{\partial P}{\partial s} ds\right) dy + \tau ds - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy\right) ds - g\,(\rho_\omega - \rho_o)\,dy\,ds \sin\theta = 0$$

où: P = pression statique;
s = distance du début de la couche limite d'eau;
τ = force de cisaillement;
ρ_o = masse volumique des hydrocarbures;
ρ_ω = masse volumique de l'eau;
(Les autres symboles sont définis à la figure 9).

Si $\Delta\rho = \rho_\omega - \rho_o$, l'équation ci-dessus se ramène à:

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial s} - g\,\Delta\rho \sin\Theta \tag{1}$$

Si le gradient de pression $\frac{\partial P}{\partial s}$ est calculé à partir de l'écoulement à l'extérieur de la couche limite, sa grandeur est principalement fonction de la hauteur hydrostatique, puisque dans l'écoulement libre, on suppose que le gradient de pression horizontal est nul.

Par conséquent $\frac{\partial P}{\partial s} = \frac{dP}{ds} = \frac{dP}{dy} = \frac{dy}{ds} = \gamma \sin\Theta$

En remplaçant cette expression dans l'équation (1), on obtient:

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = -g \sin\Theta\,(\rho + \Delta\rho) \tag{2}$$

L'intégration de cette équation, à partir de la surface du tambour, sur une épaisseur y de la pellicule d'hydrocarbures, donne:

$$\int_{\tau = \tau_o}^{\tau} d\tau = \int_{y = o}^{y} -g \sin\Theta\,(\rho + \Delta\rho)\,dy$$
$$\tau = \tau_o - yg \sin\Theta\,(\rho + \Delta\rho) \tag{3}$$

À l'interface hydrocarbures-eau, $y = \delta_1$, et l'effort de cisaillement est $\tau = \tau_i$:

$$\tau_i = \tau_o - \delta_1\, g \sin\Theta\,(\rho + \Delta\rho) \tag{4}$$

Comme le gradient de vitesse dans les hydrocarbures peut être exprimé en terme de l'effort de cisaillement des hydrocarbures:

$$\frac{du}{} = \frac{-\tau}{},$$

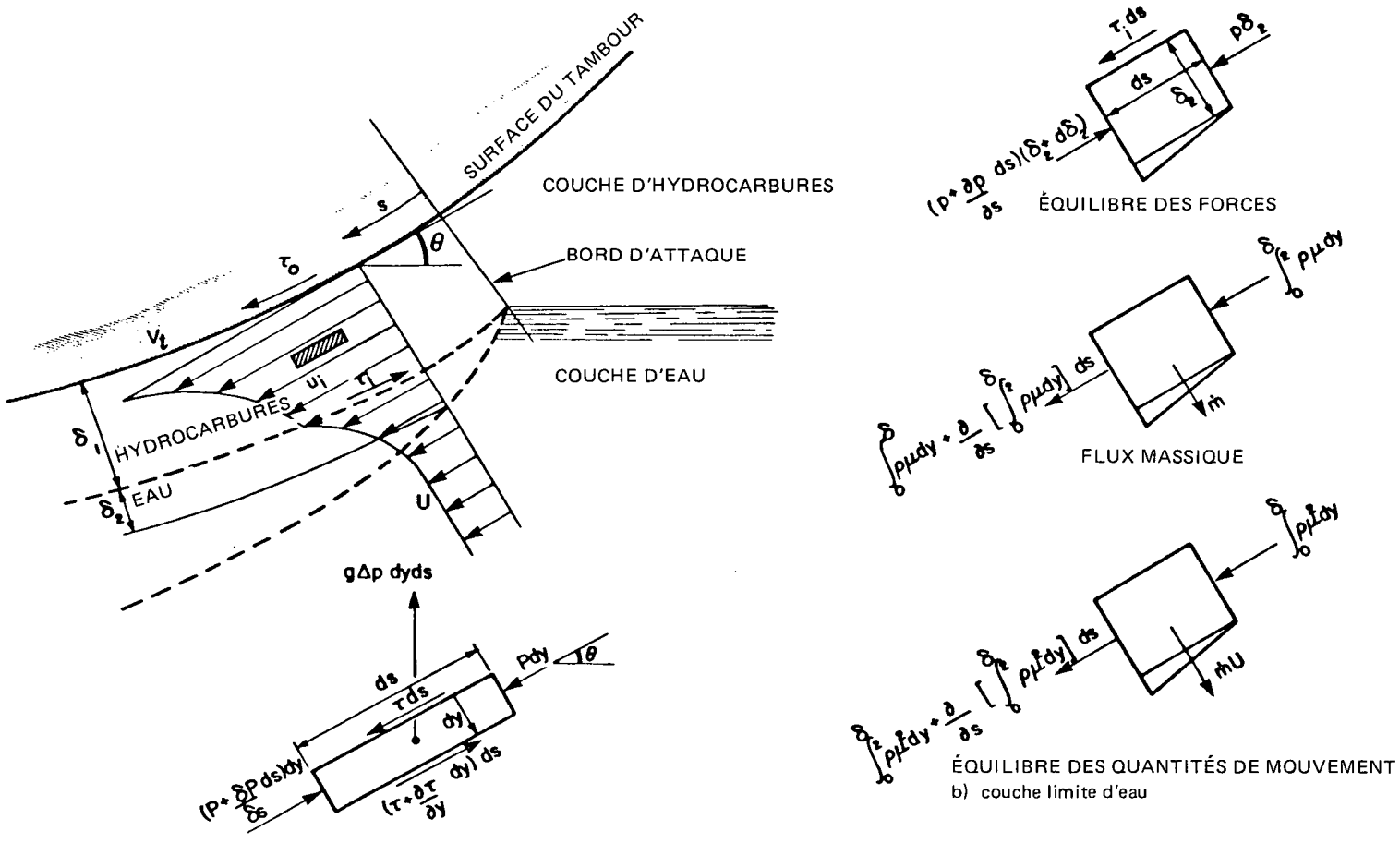


Figure 9 Schéma de l'équilibre des forces et du bilan massique par unité de largeur

il s'ensuit que

$$\frac{du}{dy} = \frac{-\tau_o}{\mu} + \frac{yg \sin \Theta (\rho + \Delta\rho)}{\mu}$$

On peut intégrer cette équation pour calculer la vitesse en fonction de τ_o et de y:

$$\frac{du}{dy} = V_t - \frac{\tau_o y}{\mu} + \frac{gy^2 \sin \Theta (\rho + \Delta\rho)}{2\mu} \tag{5}$$

où V_t = vitesse tangentielle des tambours

La quantité d'hydrocarbures de la couche limite qui est rejetée est:

$$q = \int_{y=o}^{\delta^1} \mu dy = V_t \delta_1 - \frac{\tau_o \delta_1^2}{2\mu} + \frac{g\delta_1^3 \sin \Theta (\rho + \Delta\rho)}{3\mu} \tag{6}$$

Le nombre de Reynolds fixe le seuil de turbulence dans la couche limite. Il est habituellement exprimé en termes de la vitesse de l'écoulement libre et de la distance du bord d'attaque.

$$R_s = \frac{sU_e}{\mu} \tag{7}$$

où:

s = distance du bord d'attaque le long de la couche limite;
ν = viscosité cinématique des hydrocarbures;
$U_e = u_i - U$ = vitesse réelle du courant libre;
u_i = vitesse à l'interface hydrocarbures-eau;
U = vitesse du courant libre à l'extérieur de la couche limite d'eau.

La turbulence s'établit en général lorsque R_s est supérieur à environ 5×10^5.

Annexe III

COUCHE LIMITE D'EAU

APPLICATION DE L'ÉQUATION INTÉGRALE DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT DE VON KARMAN À LA COUCHE LIMITE D'EAU

On suppose que le bord d'attaque de la couche limite d'eau est situé à la position s = o (voir la figure 9). On suppose en outre que l'écoulement est stable et bidimensionnel. Pour appliquer l'équation intégrale de la quantité de mouvement de Von Karman, on peut considérer que l'interface hydrocarbures-eau est l'une des limites de la couche limite d'eau. Soit un volume témoin constitué d'un élément de la couche limite d'eau de longueur ds (voir la figure 9). Les forces qui s'exercent sur l'élément dans la direction des "s" comprennent l'effort de cisaillement, τ_i ds, à l'interface hydrocarbures-eau, et les forces de pression à chaque extrémité du volume témoin. La force résultante est:

$$F_s = \rho\delta_2 - \left(\rho + \frac{\partial\rho}{\partial s}\, ds\right)\left(\delta_2 + d\delta_2\right) + \tau_i\, ds$$

En notant que $\frac{\partial p}{\partial s} = \gamma \sin\theta$, et en négligeant les termes de deuxième ordre, on obtient une force résultante en "s" simplifiée:

$$F_s = \left(\tau_i + \delta_2\, \gamma \sin\theta\right) ds$$

Le flux massique "$\dot{m}$" quittant le volume témoin est égal au flux massique entrant moins le flux massique sortant. De même, le flux de la quantité de mouvement U quittant le volume témoin est égal au flux de la quantité de mouvement entrant, moins le flux de quantité de mouvement sortant.

Le flux massique $\dot{m}$ est égal à:

$$\dot{m} = \int_o^{\delta_2} \rho u dy - \left[\int_o^{\delta_2} \rho u dy + \frac{\partial}{\partial s} \int_o^{\partial_2} \rho u dy\, ds\right]$$

$$\dot{m} = -\frac{\partial}{\partial s}\left(\int_o^{\delta_2} \rho u dy\right) ds$$

de sorte que le flux de quantité de mouvement en "s" du fluide traversant la surface du bas est:

$$\dot{m}U_e = -U_e \frac{\partial}{\partial s}\left(\int_o^{\delta_2} \rho u dy\right) ds$$

le flux total de la quantité de mouvement en "s" quittant le volume témoin est:

$$\int_0^{\delta_2} \rho u^2 dy + \frac{\partial}{\partial s}\left(\int_0^{\delta_2} \rho u^2 dy\right) ds - \int_0^{\delta_2} \rho u^2 dy - U_e \frac{\partial}{\partial s} \int_0^{\delta_2} \rho u dy \; ds$$

On peut simplifier en notant que:

$$U_e \frac{\partial}{\partial s}\left(\int_0^{\delta_2} \rho u dy\right) = \frac{\partial}{\partial s}\left(\int_0^{\delta_2} \rho u U_e dy\right) - \frac{\partial U_e}{\partial s} \int_0^{\delta_2} \rho u dy$$

On obtient alors le flux total de quantité de mouvement en "s" quittant le volume témoin:

$$\frac{\partial}{\partial s} \int_0^{\delta_2} \rho u\left(\left(u - U_e\right) dy\right) ds + \frac{\partial U_e}{\partial s} \int_0^{\delta_2} \rho u dy \; ds$$

On fait maintenant égaler les forces en surface dans la direction des "s" au flux total de quantité de mouvement "s" quittant le volume témoin. On suppose que la vitesse d'écoulement libre U_e est égale à $U - u_i$. Cela signifie que la vitesse d'écoulement libre U est toujours parallèle à la couche limite, ce qui n'est pas toujours le cas. L'équation intégrale de la quantité de mouvement est alors:

$$\tau_i + \delta_2 \gamma \sin\theta = \frac{\partial}{\partial s}\left\{\int_0^{\delta_2} \rho u\left(u - \left(U - u_i\right)\right) dy\right\} + \frac{\partial}{\partial s}\left(U - u_i\right)\int_0^{\delta_2} \rho u dy$$

Solution approchée de la couche limite d'eau

Pour établir la solution approchée de la couche limite d'eau, on a recours à l'équation intégrale de la quantité de mouvement, partie A, et aux méthodes de résolution approchées décrites dans le chapitre 12 de Schlichting, (1955).

Comme la vitesse d'écoulement libre U est numériquement inférieure à u_i, la quantité (U-u) est négative. La vitesse efficace d'écoulement libre est définie par:

$$-U_e = U - u_i$$

L'équation intégrale de la quantité de mouvement est alors:

$$\tau_i + \delta_2 \gamma \sin\theta = \frac{d}{ds} \int_0^{\delta_2} \rho u \left(u + U_e\right) dy - \frac{dU_e}{ds} \int_0^{\delta_2} \rho u dy \qquad (1)$$

En introduisant l'épaisseur de la quantité du mouvement "m"

$$mU_e^2 = \int_0^{\delta_2} u \left(u + U_e\right) dy \tag{2}$$

dans l'équation (1), on obtient:

$$\tau_i + \delta_2 \gamma \sin\theta = \rho \frac{d}{ds} (mU_e^2) - \frac{d}{ds} U_e \int_0^{\delta_2} \rho u dy \; ds \tag{3}$$

On suppose que la vitesse à l'interface et la vitesse d'écoulement libre varient peu en fonction de la distance, de sorte que:

$$\frac{d}{ds} (U_e) = o$$

L'équation (3) se ramène à:

$$\tau_i + \delta_2 \gamma \sin\theta = \rho U_e^2 \frac{dm}{ds} \tag{4}$$

On introduit maintenant un profil de vitesses approché pour la couche limite d'eau:

$$\frac{\mu}{-U_e} = 1 - f\,(y/\delta_2) = 1 - f\,(n) \tag{5}$$

où $n = y/\delta_2$ et $\delta_2\, dn = dy$

L'intégrale de l'équation (2)

$$\int_0^{\delta_2} u\,(U + U_e)\; dy$$

en termes de la distribution des vitesses de l'équation (5) devient:

$$- \int_0^1 \delta_2 \; U_e^2 f\,(1 - f)\; dn$$

Soit

$$l = - \int_0^1 f\,(1 - f)\; dn$$

de sorte que $m = l\delta_2$ (6)

En faisant intervenir l'épaisseur de déplacement δ^*, on obtient:

$$\delta^* \ (U - u_i) = \int_0^{\delta_2} u - (U - u_i) \ dy$$

$$- \delta^* U_e = \int_0^{\delta_2} (u + U_e) \ dy$$

$$\delta^* U_e = - \int_0^1 \delta_2 \ U_e \ f \ dn$$

Soit

$$2 = - \int_0^1 f \ dn$$

Alors

$$\delta^* = 2 \ \delta_2 \tag{7}$$

L'effort de cisaillement à l'interface peut être exprimé par la relation:

$$- \frac{\tau_i}{\rho} = \nu_2 \frac{du}{dy} \Bigg|_{y = o} = \nu_2 \ (-U_e) \ \left(- \frac{\partial f}{\partial n} \ \frac{\partial n}{\partial y}\right) \tag{8}$$

où

$$\frac{\partial f}{\partial n} = f^1 \ (0) = \beta_1 , \text{ and } \frac{\partial n}{\partial y} = \frac{1}{\delta_2},$$

ce qui donne la relation

$$\frac{\tau_i}{\rho} = \frac{\nu_2 \ U_e}{\delta_2} \ \beta_1$$

En remplaçant τ_i et m par leurs valeurs respectives définies dans les équations (7) et (6), dans l'équation (4), on obtient:

$$\delta_2 \ \frac{d\delta_2}{ds} = \frac{\nu_2 \ \beta_1}{\alpha_1 \ U_e} + \frac{\delta_2^2 \ y \sin \theta}{\rho U_e^2 \ \alpha_1} \tag{9}$$

Une solution approchée à cette équation peut être obtenue en négligeant le dernier terme qui exprime le gradient de pression, et en intégrant à partir de $\delta_2 = 0$ à $s = 0$:

$$\delta_2 = \left(\frac{2\beta_1}{\alpha_1} \ \bullet \ \frac{\nu_2 S}{U_e} \right)^{0.5} \tag{10}$$

L'effort de cisaillement à l'interface, défini dans l'équation (4), devient:

$$\tau_i = \left(\frac{\alpha_1 \beta_1}{2}\right)^{0.5} \mu_2 U_e \left(\frac{U_e}{\nu_2 S}\right)^{0.5} \tag{11}$$

On peut maintenant évaluer à la fois l'épaisseur de la couche d'eau et l'effort de cisaillement à l'interface en fonction de la distance du bord d'attaque, de la vitesse efficace d'écoulement libre et de la viscosité du fluide. Étant donné que l'épaisseur de la pellicule d'hydrocarbures est faible, la vitesse à l'interface est voisine de la vitesse tangentielle du tambour, de sorte qu'on peut supposer que la vitesse efficace de l'écoulement libre est égale à:

$$-U_e = U - V_t$$

L'évaluation de l'effort de cisaillement à l'interface τ_i permet de calculer la distribution des vitesses et la quantité d'hydrocarbures rejetée, à partir des équations (6) et (7) de la section 8.