



Environnement
Canada

Environment
Canada

ps mos

Service de la
protection de
l'environnement

Environmental
Protection
Service

Caractéristiques des émissions atmosphériques provenant de la combustion, sur place, de pétrole brut

Développement technologique

Rapport SPE 4-EC-79-1F

TD
182
R46
4/EC/79/
1F
ex.1

Direction générale du contrôle des incidences environnementales
juin 1980

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 méthodes d'analyse, politique et planification, analyse économique et technique, surveillance, guides de formation, rapports et exposés à l'enquête publique, 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.

H2# 102 133

T.D. 11
182
1246
4/EC/79/1F
ex. 1

CARACTÉRISTIQUES DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES PROVENANT DE LA COMBUSTION SUR PLACE DE PÉTROLE BRUT

par

Tom Day

Donald Mackay

Stuart Nadeau

Robert Thurier

Division de la recherche et du développement

Direction des interventions d'urgence

Direction générale du contrôle des incidences environnementales

Environnement Canada

SPE 4-EC-79-1F

Publication distribuée par
Environnement Canada
Ottawa K1A 1C8

Édition française de
*Characteristics of Atmospheric Emissions
from an In-Situ
Crude Oil Fire*
préparée par le Module d'édition française
d'Environnement Canada

ISBN: 0-662-907 26-4
N^o de cat.: EN 46-4/79-1F

©

Ministre des Approvisionnements et Services

AVIS DE RÉVISION

Le présent rapport a été lu par la Direction générale du contrôle des incidences environnementales, Service de la protection de l'environnement, et approuvé en vue de sa publication. Il ne faut pas pour autant en conclure que ce rapport reflète nécessairement les opinions et les politiques du Service de la protection de l'environnement. La mention de produits ou de marques de commerce ne doit pas non plus être interprétée comme une recommandation.

RÉSUMÉ

Le présent rapport analyse les caractéristiques et le comportement de la fumée provenant de la combustion in situ de pétrole brut dans la mer de Beaufort. D'après des travaux antérieurs sur la quantité et la dispersion probables du pétrole déversé à la suite d'une éruption en hiver, l'élaboration d'un scénario permet d'évaluer la quantité de pétrole brut pouvant être brûlée, la taille des mares de pétrole enflammées, la durée de combustion ainsi que le nombre et la fréquence des allumages de mares au cours de la période en question. Deux périodes sont retenues: le début du mois de juin, lorsque le pétrole parvient à la surface de la glace de mer de l'année et le mois de septembre, lorsque le pétrole peut migrer à la surface de la glace de mer de plusieurs années.

L'étude des données actuelles porte sur les caractéristiques de la combustion du pétrole, en particulier les émissions, sur les conditions atmosphériques susceptibles de régner dans la mer de Beaufort au cours des périodes mentionnées et leur effet sur la dispersion du panache de fumée, ainsi que sur la composition éventuelle du pétrole. La meilleure méthode suggérée consiste à considérer le comportement des émissions, au cours du nettoyage, comme un nombre multiple des "combustions unitaires" dans lesquelles une quantité standard de pétrole est brûlée. Le comportement total est obtenu en superposant le nombre requis de "combustions unitaires". L'élévation du panache et la dispersion d'une combustion unitaire sont évaluées, d'où l'obtention de données sur la concentration de particules (suie), de SO_2 , de CO_2 , de CO, d'hydrocarbures et de métaux à différentes distances en aval de la zone de combustion. Le rapport décrit les études en laboratoire et sur place entreprises en vue de recueillir des données sur les caractéristiques des émissions provenant de la combustion de pétrole brut.

Les auteurs concluent que les concentrations de CO et de SO_2 dans l'atmosphère seront acceptables et généralement inférieures aux niveaux prescrits dans l'Objectif national afférent à la qualité de l'air ambiant. Les concentrations de suie qui peuvent se former à quelques kilomètres des lieux de combustion seront souvent supérieures aux niveaux fixés dans l'Objectif national afférent à la qualité de l'air; cependant, à des distances de plus de 10 km, la qualité de l'air sera similaire à celle des zones urbaines du Canada. Comme aucune concentration tolérable n'a généralement été fixée pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou les métaux en suspension dans l'air émis par

la combustion, les auteurs recommandent de réduire au minimum l'exposition des humains au panache de fumée en prenant les mesures d'intervention appropriées et en évitant de brûler le pétrole lorsque les conditions météorologiques favorisent la dispersion des panaches jusqu'aux agglomérations. Des recommandations sont formulées pour d'autres études ultérieures.

ABSTRACT

The characteristics and behaviour of smoke generated from in-situ burning of crude oil in the Beaufort Sea are examined. From a review of previous work on the likely magnitude and distribution of spilled oil from a winter blowout, a scenario is postulated giving the amount of oil which could be burned, the size of burned oil pools, the individual burn durations and the number of frequencies of pools burned over the time period in question. Two time periods are considered: early June, when oil migrates to the surface of first year sea ice, and September, when it is believed oil may migrate to the surface of multiyear sea ice.

Reviews of available information about oil combustion characteristics are presented - particularly as they relate to emissions; the atmospheric conditions likely to prevail in the Beaufort Sea during the time periods in question and their effect on smoke plume dispersion; and possible oil compositions. It is suggested that it is best to treat the emission behaviour during cleanup as a multiple number of "unit burns" in which a standard quantity of oil is burned. The total behaviour is obtained by superimposing the required number of "unit burns". The plume rise and dispersion of a unit burn is calculated and yields data on the concentration of particulates (soot), SO₂, CO₂, CO, hydrocarbons and metals at various distances downwind. Laboratory and field studies which were undertaken to provide data on the emission characteristics of crude oil fires are described.

It is concluded that the atmospheric concentrations of CO and SO₂ will be acceptably low and usually below National Air Quality Objective levels. Concentrations of soot which may be achieved within a few kilometres of the fires will often be above National Air Quality Objective levels; but at distances greater than about 10 km, the air quality will be comparable to that of urban areas in Canada. Since there are no generally accepted tolerable concentrations for airborne polynuclear aromatic hydrocarbons or metals, both of which will be emitted from the fires, it is recommended that human exposure to the smoke plume be minimized by appropriate deployment of countermeasures personnel, and by avoiding burning under weather conditions during which plumes will reach communities. Recommendations are made for some further studies.

PRÉFACE

La présente étude a été faite par le département de génie chimique et de chimie appliquée de l'Université de Toronto pour le compte de la Direction des interventions d'urgence du ministère de l'Environnement. L'expert scientifique était M. Peter Blackkall de la Direction des interventions d'urgence, Edmonton (Alb.).

L'objectif consistait à effectuer une étude préliminaire de la pollution atmosphérique engendrée par la combustion de pétrole brut dans la mer de Beaufort afin de déterminer la nécessité d'autres études plus détaillées. Étant donné le nombre restreint d'expériences (aucune n'a été faite dans le Nord), il a fallu émettre de nombreuses hypothèses, notamment en ce qui concerne les conditions atmosphériques. Il faut donc en tenir compte dans l'analyse des conclusions du rapport.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

On a préparé un plan d'action qui décrit la distribution temporelle et géographique de la combustion du pétrole dans la mer de Beaufort. Le bilan volumétrique au lieu de l'éruption indique que le pétrole peut brûler dans des mares d'environ 1 m^3 ; ces dernières sont groupées par neuf ou dix. Environ 1000 groupes peuvent être allumés.

Les concentrations de SO_2 , de matières particulaires, de CO et de métaux dans l'atmosphère ont été évaluées à proximité de l'incendie et à des distances d'environ 10 et 40 km. Elles ont été comparées aux niveaux fixés dans l'Objectif national afférent à la qualité de l'air ambiant et aux niveaux types enregistrés dans les agglomérations urbaines canadiennes. Les auteurs concluent qu'au voisinage immédiat de l'incendie, les concentrations de particules (suie) dépasseront la limite tolérable et que ces zones devront être évitées. Les concentrations calculées dans un rayon de 10 à 40 km du lieu de l'incendie et au-delà seront suffisamment faibles et il n'y aura aucun effet nocif.

Comme la toxicité des métaux et des hydrocarbures aromatiques polycycliques présents dans la suie n'est pas encore bien connue, la prudence exige de minimiser l'exposition de l'équipe de recherche et des habitants des agglomérations à ces substances. Pour ce faire, il convient de bien planifier les opérations, compte tenu des prévisions météorologiques à court terme.

Les auteurs recommandent d'entreprendre d'autres travaux de recherche afin de déterminer si la combustion accroît ou non l'émission d'hydrocarbures aromatiques polycycliques. En outre, d'autres recherches doivent porter sur le mécanisme fondamental de la combustion, notamment la formation de la suie et ses propriétés, en particulier la taille des particules, et le comportement des métaux. Il est recommandé d'effectuer une expérience de combustion du pétrole en conditions réelles et de procéder à des mesures de la qualité de l'air afin de valider ces calculs d'une manière générale.

Par ailleurs, afin d'obtenir des estimations plus précises, il faudra recueillir des données atmosphériques pertinentes (notamment les couches de brassage et les classes de stabilité) pour la mer de Beaufort, pour différentes périodes de combustion possibles. Enfin, dès l'obtention d'échantillons de pétrole de l'Arctique, ces derniers devront être soumis aux analyses chimiques et physiques qui conviennent.

TABLE DES MATIÈRES

AVIS DE REVISION	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	VI
PRÉFACE	VII
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	VIII
1 INTRODUCTION	1
1.1 Mesures d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures dans la mer de Beaufort	1
1.2 Scénario du déversement d'hydrocarbures	2
1.3 Caractéristiques de la combustion du pétrole	9
1.4 Conditions de dispersion atmosphérique dans la mer de Beaufort	12
1.5 Composition du pétrole	30
2 EXPÉRIENCES	32
2.1 Études en laboratoire de la combustion du pétrole	32
2.1.1 Équipement et mode opératoire	32
2.1.2 Microphotographie de la suie	34
2.1.3 Résultats de la combustion en laboratoire	36
2.1.4 Analyse des métaux	38
2.1.5 Analyse du CO	41
2.2 Études sur le terrain de la combustion du pétrole	41
3 CALCULS DE DISPERSION	47
3.1 Combustions unitaires	47
3.1.1 Hypothèses	47
3.1.2 Calcul de l'élévation du panache de fumée	47

X

3.1.3	Dispersion du SO ₂	48
3.1.4	Matières particulaires (suie)	53
3.1.5	Concentrations de métaux	61
3.1.6	Oxyde de carbone	61
3.1.7	Dispersion par vent nul	61
3.2	Superposition de panaches de fumée provenant d'un groupe de nappes de pétrole enflammées	61
4	ANALYSE	64
4.1	Hydrocarbures aromatiques polynucléaires	67
4.2	Métaux	69
4.3	Propriétés des hydrocarbures du Nord	69
4.4	Recherches à venir	70
	BIBLIOGRAPHIE	71
	REMERCIEMENTS	75
	ANNEXE A	
	Élévation du panache de fumée	77
	ANNEXE B	
	Calculs des concentrations de SO ₂ au niveau du sol	81
	ANNEXE C	
	Calculs des concentrations et des vitesses de dépôt de la suie au niveau du sol	87

LISTE DES FIGURES

1	CARTE DE LA RÉGION À L'ÉTUDE	3
2	ZONE MAZOUTÉE DANS UN MILIEU GLACIEL TYPE	4
3	BILAN VOLUMÉTRIQUE DU PÉTROLE	10
4	FRÉQUENCES DES INVERSIONS AU SOL (%)	14
5	FRÉQUENCES DES INVERSIONS AU SOL (%)	15
6	FRÉQUENCES DES INVERSIONS AU SOL (%)	16
7	COUCHE DE BRASSAGE	18
8	ISOPLÈTHES ($m \times 10^2$) DES COUCHES DE BRASSAGE MAXIMALES MOYENNES (APRÈS-MIDI) EN ÉTÉ	19
9	ISOPLÈTHES ($m \times 10^2$) DES COUCHES DE BRASSAGE MAXIMALES MOYENNES (APRÈS-MIDI) EN AUTOMNE	20
10	ISOPLÈTHES ($m \times s^{-1}$) DE LA VITESSE MOYENNE DES VENTS, EN ÉTÉ, PONDÉRÉS DANS LA COUCHE DE BRASSAGE MAXIMALE (APRÈS-MIDI)	21
11	ISOPLÈTHES ($m \times s^{-1}$) DE LA VITESSE MOYENNE DES VENTS, EN AUTOMNE, PONDÉRÉS DANS LA COUCHE DE BRASSAGE MAXIMALE (APRÈS-MIDI)	22
12	ISOPLÈTHES ($m^2 \times s^{-1} \times 10^3$) DES COEFFICIENTS DE VENTILATION MAXIMAUX MOYENS (APRÈS-MIDI) EN ÉTÉ	23
13	ISOPLÈTHES ($m^2 \times s^{-1} \times 10^3$) DES COEFFICIENTS DE VENTILATION MAXIMAUX MOYENS (APRÈS-MIDI) EN AUTOMNE	24
14	HAUTEUR DU PANACHE EN FONCTION DE LA VITESSE DES VENTS	26
15	CONFINEMENT D'UN PANACHE DANS UNE COUCHE DE BRASSAGE	28
16	PÉNÉTRATION DU PANACHE DANS LE PLAFOND D'UNE COUCHE DE BRASSAGE	28
17	COMPORTEMENT POSSIBLE DU PANACHE PAR VENT NUL.	29
18	APPAREIL	33
19	MICROPHOTOGRAPHIE DE LA SUIE	35
20	AMÉNAGEMENT DU SITE DE COMBUSTION	44
21	DÉBUT DE LA COMBUSTION	44
22	COMBUSTION DEUX MINUTES APRÈS L'ALLUMAGE	45
23	COMBUSTION QUATRE MINUTES APRÈS L'ALLUMAGE	45

24	COMBUSTION CINQ MINUTES APRÈS L'ALLUMAGE	46
25	FIN DE LA COMBUSTION EXPÉRIMENTALE	46
26	CONCENTRATION D'ANHYDRIDE SULFUREUX EN FONCTION DE LA DISTANCE	49
27	CONCENTRATION D'ANHYDRIDE SULFUREUX EN FONCTION DE LA DISTANCE	50
28	CONCENTRATION DE LA SUIE EN FONCTION DE LA DISTANCE	51
29	CONCENTRATION DE LA SUIE EN FONCTION DE LA DISTANCE	55
30	CONCENTRATION DE LA SUIE EN FONCTION DE LA DISTANCE	56
31	DIVISION DE LA SUPERFICIE DE COMBUSTION EN INCRÉMENTS	89

LISTE DES TABLEAUX

1	RÉPARTITION TEMPORELLE DES COMBUSTIONS EN JUIN	8
2	ANALYSE DES MÉTAUX CONTENUS DANS LES ÉCHANTILLONS DE PÉTROLE BRUT NON ALTÉRÉ	30
3	RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES DE LA COMBUSTION DE PÉTROLE EN LABORATOIRE	37
4	RÉSULTATS DES ANALYSES DES MÉTAUX	40
5	CONCENTRATION DE SO ₂ (µg/m ³) À DES DISTANCES DÉTERMINÉES SOUS LE VENT (km)	52
6	CONCENTRATIONS DE LA SUIE (µg/m ³) À DES DISTANCES SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES	57
7	CONCENTRATIONS DE LA SUIE (µg/m ³) À DES DISTANCES SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES	58
8	CONCENTRATIONS DE LA SUIE (µg/m ³) À DES DISTANCES SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES	59
9	CONCENTRATIONS DE LA SUIE (µg/m ³) À DES DISTANCES SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES	60
10	NIVEAUX ATMOSPHÉRIQUES DE SO ₂ , DE MATIÈRES PARTICULAIRES ET DE CO AU CANADA (µg/m ³)	65
11	CONCENTRATIONS PRÉVUES AU COURS DE LA COMBUSTION (µg/m ³)	66
12	FORMULES DE CALCUL DE L'ÉLÉVATION DU PANACHE DE FUMÉE	78
13	ÉLÉVATION CALCULÉE DU PANACHE DE FUMÉE H (mètres)	79
14	CLASSES DE STABILITÉ	83
15	CLÉS DES CLASSES DE STABILITÉ	84

1 INTRODUCTION

1.1 Mesures d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures dans la mer de Beaufort

Le bassin sédimentaire du delta du Mackenzie, de la mer de Beaufort et de l'île Banks est l'une des provinces pétrolières frontalières les plus prometteuses. Des découvertes ont été faites à terre dans la péninsule Tuktoyaktuk, et sur des îles artificielles dans le cadre de programmes de forage réalisés dans la zone littorale peu profonde. En 1976, des forages ont été entrepris au large, à partir de navires de forage, et se sont poursuivis en 1977 avec succès. Plusieurs études des incidences environnementales possibles de l'exploitation pétrolière dans cette région ont été faites; par exemple, l'analyse critique préliminaire de Pimlott et al., (1976) et plusieurs rapports-synthèses et rapports techniques sur le projet d'étude de la mer de Beaufort, notamment les études de Logan et al., (1975, 1975a) et Ross et al., (1977).

Le matériel d'intervention classique utilisé en cas de déversement d'hydrocarbures, tel que les barrages flottants et les écumeurs, est pratiquement inutilisable dans la mer de Beaufort en raison des glaces, de intempéries et de l'insuffisance de main d'oeuvre locale. Il a été démontré que la combustion sur place, l'une des mesures d'intervention les plus efficaces, peut éliminer le pétrole au fur et à mesure qu'il s'accumule à la surface de la glace au début de juin (Norcor, 1975). En conséquence, de gros efforts ont été déployés en vue de mettre au point des dispositifs d'allumage et d'évaluer la rentabilité de la combustion (Purves, 1977).

L'un des effets négatifs éventuels de la combustion est le dégagement dans l'atmosphère d'une quantité importante de produits de combustion, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de l'air, du côté sous le vent. Le rapport aborde le problème de l'évaluation des incidences de la combustion sur la qualité de l'air d'une manière approximative, à partir de travaux de recherche, afin de déterminer, entre autres, si d'autres expériences sont nécessaires.

Les répercussions néfastes peuvent être multiples. Ainsi, des polluants solides ou gazeux, en concentrations particulièrement élevées, peuvent atteindre les agglomérations,

notamment Tuktoyaktuk, situé à environ 70 km et 140 km des deux sites de forage de 1976. La qualité de l'air ambiant et la visibilité peuvent également être altérées. De la suie peut se déposer sur la neige et la glace, réduisant l'albédo et provoquant une fonte précoce, ce qui peut se répercuter sur les conditions météorologiques de la région (Walker, 1975). Des composés chimiques, généralement inexistant dans la région, peuvent se déposer dans les écosystèmes marins, littoraux ou terrestres. Ces dépôts peuvent perturber l'équilibre écologique.

Parmi les composés indésirables, mentionnons les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Les auteurs du présent rapport tentent de mettre en évidence certains de ces problèmes éventuels en donnant des estimations quantitatives de l'exposition à ces polluants.

1.2 Scénario du déversement d'hydrocarbures

Dans l'évaluation des incidences environnementales de la combustion du pétrole, il est nécessaire, en premier lieu, d'émettre certaines hypothèses sur le volume, la nature et l'emplacement du pétrole à enflammer. Les auteurs du présent rapport ont élaboré un scénario d'éruption de pétrole et de gaz dans la mer de Beaufort. L'emplacement est délimité par la zone indiquée à la figure 1. Le mouvement des glaces dans cette région a été étudié par Norcor (1977) et le scénario supposait le comportement d'une éruption en hiver. Ces hypothèses forment l'essentiel du scénario.

L'éruption débute vers la fin de la saison de forage (c'est-à-dire en août ou en septembre); il est donc trop tard pour forer un puits d'intervention. Le pétrole jaillit à raison de 2500 barils par jour en moyenne ($398 \text{ m}^3/\text{jour}$) pendant les trente premiers jours, puis diminue à 1000 barils/jour ($159 \text{ m}^3/\text{jour}$) pendant les autres mois de l'hiver. Le gaz naturel qui jaillit avec le pétrole (généralement un rapport de volume gaz/pétrole de 150/1) s'échappe à travers la glace et n'intervient pas dans le processus de combustion.

La glace de mer de l'année commence généralement à se former à la fin de septembre, dans la mer de Beaufort. Elle atteint une épaisseur d'environ deux mètres au mois de mai suivant et reste généralement fixée à la côte. Entre la banquise polaire (habituellement 300 à 400 km au large des côtes en été) et la glace fixée, il y a une zone

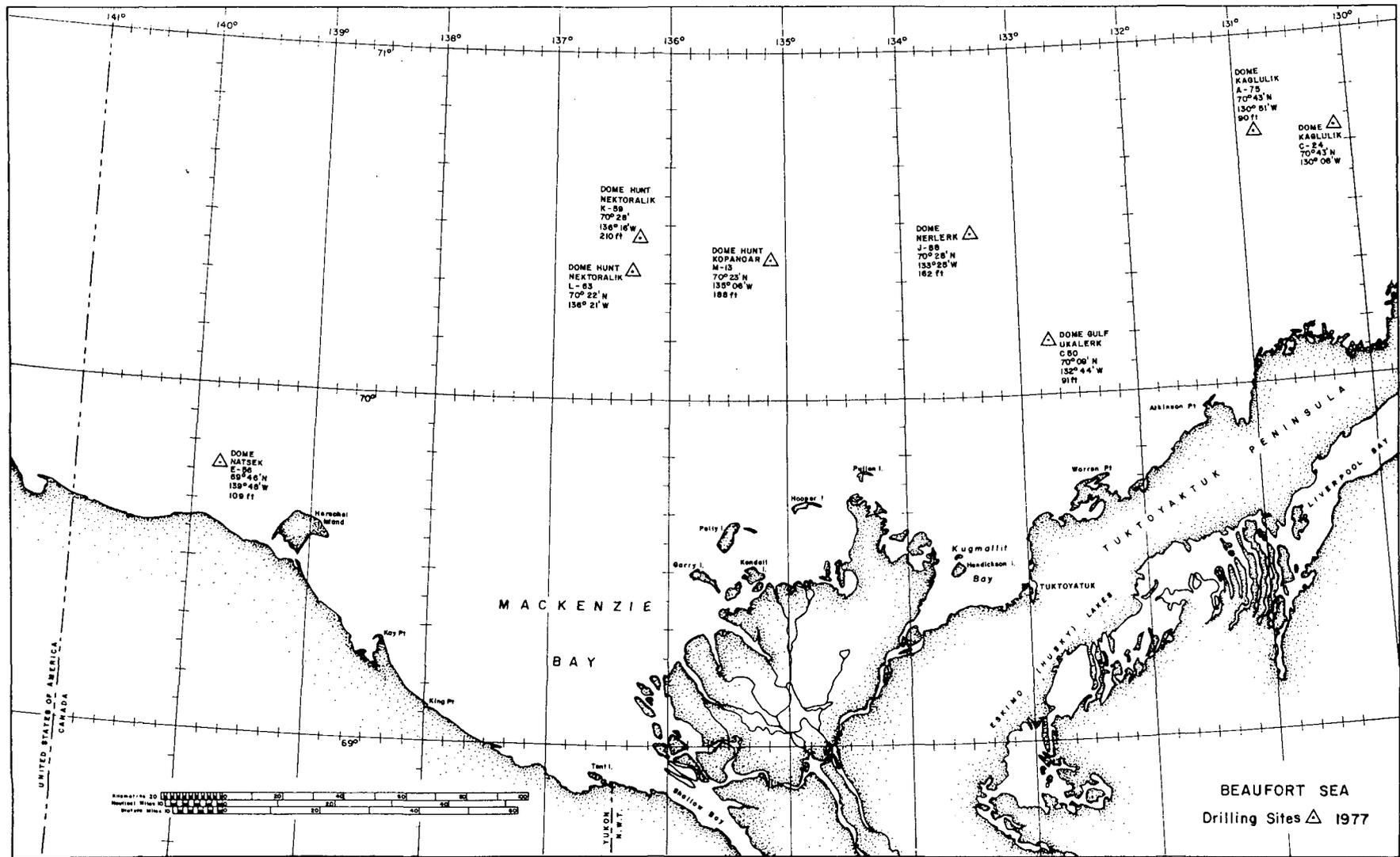


FIGURE 1 CARTE DE LA RÉGION À L'ÉTUDE

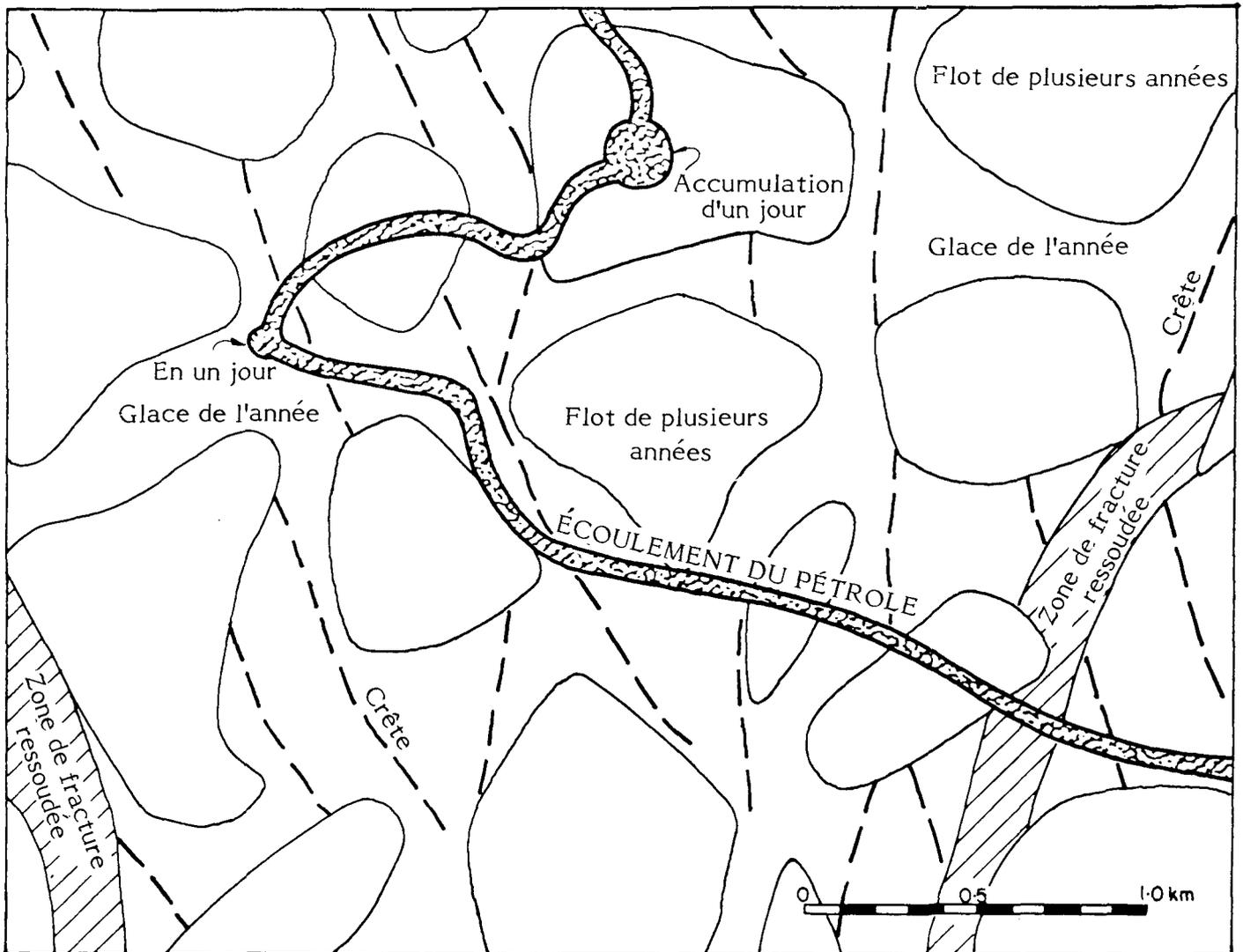


FIGURE 2 ZONE MAZOUTÉE DANS UN MILIEU GLACIEL TYPE

Remarque: Ce diagramme donne une représentation schématique des moyennes calculées; il n'identifie pas une région spécifique.

Source: NORCOR (1977)

de "transition" où il est impossible de prédire avec précision le régime des glaces. Il peut y avoir des zones de glace de l'année, de glace de plusieurs années et d'eaux libres et toute la banquise peut se déplacer d'une façon irrégulière, sous l'action des vents et des courants.

En cas d'éruption d'un puits de pétrole, ce dernier "enduit" la face inférieure des glaces à la dérive. L'épaisseur de la nappe de pétrole dépend de son étalement latéral (environ 200 m au maximum), de la vitesse d'écoulement du pétrole et du mouvement des glaces (qui varie de 0 à 10 km/jour, en moyenne 1 km/jour environ). D'octobre à mai inclusivement, une bande de glace d'environ 240 km de long et de 100 m de large, peut être enduite de pétrole. Le volume total de pétrole déversé au cours de ces huit mois est de $45\,700\text{ m}^3$ (287 000 barils) (soit $31 \times 2500 + 210 \times 1000$ barils) (ou 10 000 000 gallons R.-U.) La zone contaminée a une superficie de 24 km^2 environ et l'épaisseur moyenne de la pellicule de pétrole est de 1,9 mm. En réalité, on estime que 35 p. 100 seulement de la couche de pétrole ont une épaisseur de plus de 5 mm, soit l'épaisseur nécessaire pour permettre l'allumage et la combustion. La région mazoutée est représentée à la figure 2, tirée de l'étude de Norcor (1977).

En hiver, le pétrole est emprisonné dans la glace en formation et reste intact jusqu'au début du dégel. À mesure que la neige fond et que l'albédo diminue, les zones supérieures de la glace se réchauffent, le pétrole commence à remonter par des chenaux de saumure et forme des mares à la surface. Ce processus s'accélère de lui-même. Dès que le pétrole parvient près de la surface, il absorbe plus rapidement les rayons solaires (par la réduction de l'albédo), ce qui accroît la fonte locale des glaces. Ce phénomène offre des avantages: la glace non contaminée fond plus lentement et peut ainsi servir de plate-forme aux opérations de nettoyage de la glace contaminée, par exemple la combustion. En outre, la glace qui entoure les mares de pétrole demeure intacte plus longtemps, ce qui permet de délimiter la zone mazoutée.

Aux fins du présent rapport, les auteurs supposent que la couche de pétrole qui recouvre la glace de l'année atteint l'épaisseur requise pour la combustion vers le 1^{er} juin et continue de s'étaler pendant environ 20 jours. Cette date varie chaque année selon les conditions météorologiques, en particulier les chutes de neige et l'insolation. Le pétrole commencera probablement à s'écouler vers le 10 mai.

On connaît peu de choses sur la migration du pétrole dans la glace de plusieurs années, mais d'après certains travaux récents (1977) de Milne, il semblerait que le pétrole peut atteindre la surface en septembre. Il est supposé que 30 p. 100 environ du pétrole sont emprisonnés sous la glace de plusieurs années, ce qui donne 70 p. 100 sous la glace de l'année.

Il est possible de déterminer ainsi un bilan volumétrique approximatif du pétrole. Sur la totalité du pétrole ayant atteint la surface, environ 30 p. 100 peuvent s'évaporer après exposition à l'air pendant près de 10 jours. Il est probable que le pétrole destiné à être brûlé sera enflammé environ cinq jours, en moyenne, après avoir atteint la surface. À ce moment-là, environ 10 p. 100 du pétrole se seront vraisemblablement évaporés.

Il reste à déterminer la quantité de pétrole qui peut être brûlée. Il est établi arbitrairement qu'environ 35 p. 100 du pétrole ayant atteint la surface peuvent être brûlés. D'après le bilan volumétrique total supposé de la figure 3, 9500 m³ de pétrole sont brûlés en juin et 3800 m³ en septembre. Il reste 2100 m³ de résidus imbrûlés; et 11 200 m³ de pétrole sont transformés en CO₂, en CO, en hydrocarbures non brûlés ou en suie. Bien que ces chiffres soient approximatifs, il est improbable que la marge d'erreur soit supérieure à 50 p. 100. Il en résulte que les résidus forment 16 p. 100 du pétrole soumis à la combustion.

À mesure que le pétrole atteint la surface pendant cette période de 20 jours (soit en juin, soit en septembre), la combustion des mares de pétrole est amorcée à l'aide de dispositifs d'allumage, largués soit par aéronef à voilure fixe, soit par hélicoptère, ou mis en place manuellement.

Même si la configuration des mares et le processus de combustion sont inconnus, il faut faire certaines estimations. On suppose que le pétrole migre à la surface dans des mares contenant chacune environ 1 m³ de pétrole pour une zone de 10 à 15 m de diamètre. Ces mares sont groupées par dix environ et sont allumées simultanément.

Le bilan volumétrique approximatif du pétrole est calculé d'après les hypothèses suivantes:

- 70 p. 100 du pétrole sont emprisonnés sous la glace de l'année et 30 p. 100 sous la glace de plusieurs années (Norcor, 1977).

- Environ 6 p. 100 du pétrole emprisonné sous la glace de l'année et 12 p. 100 du pétrole sous la glace de plusieurs années n'atteignent pas la surface. Il s'enfonce, se dissout, se disperse ou est piégé dans la glace (Norcor, 1977).
- 35 p. 100 du pétrole ayant atteint la surface forment des mares d'une épaisseur suffisante pour permettre la combustion (Norcor, 1977).
- Le pétrole est concentré dans des mares; 10 p. 100 s'évaporent avant la combustion, laissant 1 m^3 de pétrole d'une épaisseur moyenne de 7 mm sur une superficie de 143 m^2 ou une zone de 13,5 m de diamètre (Norcor, 1977).
- Une mare moyenne brûle pendant 10 minutes, laissant des résidus de $0,16 \text{ m}^3$ (Coupal, 1976). Il s'agit de la "combustion unitaire" utilisée pour calculer la dispersion.
- Au cours des opérations de combustion, 9,5 mares en moyenne sont allumées à peu près simultanément; parfois le feu se propage d'une mare à l'autre. Ce "groupe" contient $9,5 \text{ m}^3$ de pétrole et brûle pendant une heure, trois mares au maximum brûlant à la fois.
- Il y a 9500 mares, formant 1000 groupes en juin et 3800 mares formant 400 groupes en septembre.
- Étant donné que la longueur totale de la bande contaminée est de 240 km, chacun des 1400 groupes a une longueur de 171 m et une largeur de 100 m (c'est-à-dire la largeur de la bande).
- La bande mazoutée est sinueuse et est contenue dans un rectangle de 80 km sur 30 km, soit une superficie totale de 240 km^2 . Selon les observations de Norcor (1977), le mouvement net des glaces est bien inférieur à la distance totale parcourue, notamment pendant la période "statique" en février et en mars.

La répartition dans le temps des combustions unitaires est donnée au tableau 1. Ce dernier n'est pas basé sur des statistiques, mais sur des hypothèses. Il ressort de ce tableau qu'il n'y a jamais plus de 10 groupes de mares qui brûlent à la fois. Cette

TABLEAU 1 RÉPARTITION TEMPORELLE DES COMBUSTIONS EN JUIN

Nombre de combustions simultanées d'une durée de 1 h*	Durée de la combustion (h)	Nombre total de combustions de groupes
10	18	180
9	18	162
8	18	144
7	18	126
6	18	108
5	18	90
4	18	76
3	18	54
2	19	38
1	22	22
0	151	0
Total	336 (14 jours)	

* On suppose que 9,5 mares brûlent chacune pendant 10 minutes, certaines simultanément, ce qui donne une période de combustion totale d'une heure.

estimation est prudente (pessimiste); en juin, trois groupes en moyenne brûlent simultanément. En septembre, ce nombre doit être multiplié par 0,4.

Dans de nombreux cas, ces hypothèses sont arbitraires; elles sont jugées raisonnables et donnent une base pour calculer le comportement de la dispersion. Le bilan volumétrique est résumé à la figure 3.

Le problème logistique de l'allumage de ces mares mérite une attention particulière. On suppose qu'il faut 15 dispositifs d'allumage pour enflammer un groupe (compte tenu des échecs dus au mauvais fonctionnement du dispositif, aux vents violents, au ratage des cibles ou à l'insuffisance de matières volatiles inflammables), ce qui porte à 15 000 le nombre total de dispositifs requis en juin. On peut utiliser, à cette fin, trois hélicoptères, quatorze jours sur vingt (les autres jours, les conditions de vol sont impossibles) à raison de six heures par jour au-dessus de la zone-cible et larguer un dispositif toutes les minutes en moyenne.

En septembre, les conditions de vol sont moins bonnes, mais en contrepartie, la quantité de pétrole à brûler est moindre; le problème logistique se pose donc avec la même acuité.

1.3 Caractéristiques de la combustion du pétrole

Une étude approfondie de la combustion du pétrole dépasse l'objet du présent rapport; toutefois, il est utile d'en connaître les principaux processus car ils modifient les caractéristiques des émissions dues à la combustion du pétrole. Les processus associés à un incendie de pétrole sur la terre ferme ont été mentionnés dans diverses sources, notamment Purves (1977), et dans divers textes sur la combustion. Les principaux points sont passés en revue ci-après.

La réaction de combustion des hydrocarbures au contact de l'oxygène de l'air se produit en phase vapeur, dans la zone des flammes, au-dessus du déversement de pétrole. La chaleur exothermique de réaction engendrée par les processus de combustion se dissipe sous forme de rayonnement dans toutes les directions et sous forme de chaleur sensible dans le panache de combustion. Le rayonnement produit par les flammes réchauffe la mare de pétrole et provoque l'évaporation des hydrocarbures volatils qui pénètrent alors

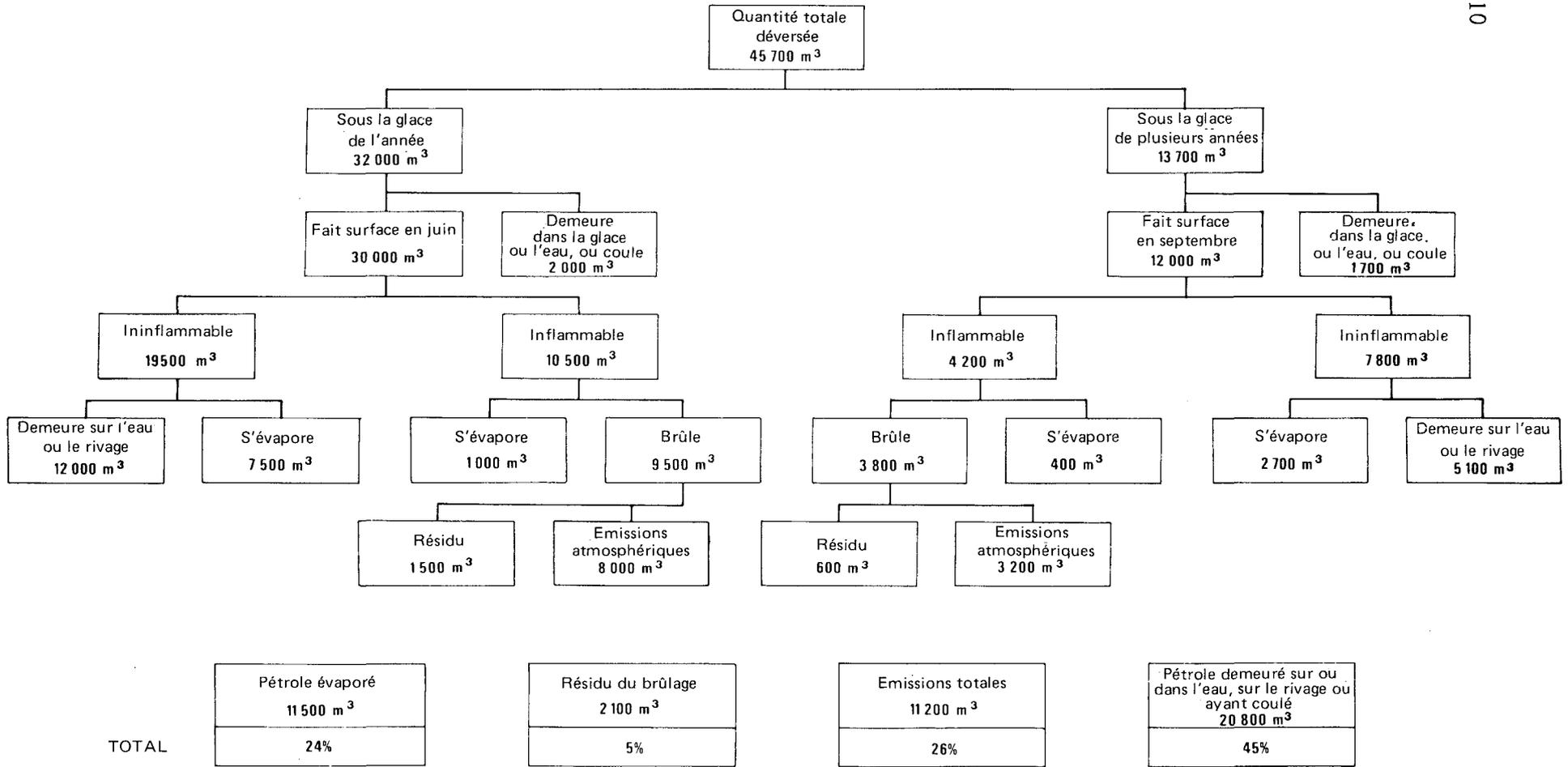


FIGURE 3 BILAN VOLUMÉTRIQUE DU PÉTROLE

dans la zone des flammes et réagissent au contact de l'air. Le feu s'entretient donc de lui-même; la chaleur engendrée assure l'apport de combustible gazeux pour la combustion.

Le problème de l'allumage du pétrole brut provient de la difficulté première à produire une quantité suffisante de vapeur pour provoquer la combustion. Divers dispositifs d'allumage, destinés essentiellement à réchauffer une partie de la mare de pétrole jusqu'à une température supérieure au point d'inflammation du pétrole, ont été proposés.

La combustion se poursuit jusqu'à ce que la quantité de vapeur produite diminue, soit en raison de l'appauvrissement du pétrole en matières volatiles, soit en raison de la diminution d'épaisseur de la mare de pétrole, d'où un abaissement de sa température au-dessous du point d'inflammation provoqué par le transfert de la chaleur dans l'eau ou dans la glace. En d'autres termes, la combustion se fait plus facilement lorsque la couche de pétrole est plus épaisse, sa résistance thermique étant plus élevée.

D'après les observations faites sur la combustion du pétrole, la mare peut devenir très chaude et provoquer la fonte de la glace sous-jacente, voire l'ébullition de l'eau sous-jacente. Par suite du fort crépitement du pétrole dans la zone des flammes, les matières normalement non volatiles peuvent être transportées sous forme de gouttelettes dans la zone de combustion. Ce phénomène est particulièrement important car il permet à des composés chimiques non volatils et contenant des métaux de pénétrer dans la zone de combustion; il en résulte la présence de métaux dans les émissions.

Dans un système de combustion idéal, comme un four ou un moteur à réaction, une très grande quantité d'hydrocarbures, soit plus de 99 p. 100, est transformée en anhydride carbonique. Dans le cas d'un incendie à terre, la quantité d'oxygène est insuffisante pour permettre à toute la vapeur des hydrocarbures de se transformer en anhydride carbonique. Il en résulte la formation de particules de carbone visibles dans la fumée noire ou la suie.

Parmi les caractéristiques importantes des incendies de pétrole, mentionnons le pourcentage de carbone transformé en suie et en d'autres particules solides distinctes de l'anhydride carbonique gazeux et de l'oxyde de carbone. Comme aucune donnée n'a été recueillie sur ce sujet, plusieurs expériences simples et sur une petite échelle ont été faites en vue de déterminer la valeur probable du pourcentage de carbone présent dans le

pétrole et transformé en suie. De même, en l'absence de données sur l'évolution des métaux présents dans le pétrole, d'autres expériences ont dû être menées.

Les composés sulfureux dans le pétrole se présentent en partie sous forme de sulfure d'hydrogène qui sera sans doute transformé en anhydride sulfureux dans les flammes, et en partie sous forme de soufre complexe contenant des composés qui tendent à s'accumuler dans les résidus d'ébullition du pétrole. Aux fins du présent rapport, les auteurs supposent que tout le soufre présent dans le pétrole est transformé en gaz, sous forme d'anhydride sulfureux. Il se peut que cette hypothèse soit pessimiste car il est prévu qu'une partie du soufre restera dans les résidus imbrûlés. L'hypothèse, toutefois, sert de base pour effectuer des calculs, et les concentrations d'anhydride sulfureux résultantes peuvent être ramenées à des valeurs plus faibles si d'autres hypothèses sont jugées plus valables.

1.4 Conditions de dispersion atmosphérique dans la mer de Beaufort

Les études les plus détaillées des conditions climatiques et météorologiques de la vallée du Mackenzie et de la mer de Beaufort ont été faites par Burns (1973), Walker (1975) et Berry et al., (1975). En outre, certaines statistiques pertinentes portant sur la climatologie appliquée à la lutte contre la pollution de l'air ont été publiées par Munn et al., (1970), Shaw et al., (1972) et Portelli (1977). Une analyse complète des conditions météorologiques et climatiques de cette région dépasse l'objet de ce rapport; néanmoins, il est nécessaire de formuler quelques remarques générales qui serviront de base aux calculs.

Il est généralement reconnu que les données climatiques, météorologiques et atmosphériques de la région de la mer de Beaufort sont moins nombreuses que celles sur les conditions régnant dans les régions du sud du Canada, plus tempérées et plus peuplées. Toutefois, un nombre considérable de données météorologiques ont été recueillies au cours des dernières années, à certaines stations telles que Inuvik, Sachs Harbour et Cape Parry et par des navires dans la mer de Beaufort. Les conditions moyennes et extrêmes dans la région ne sont toutefois pas bien connues. Parmi les phénomènes atmosphériques importants, il faut mentionner l'inversion. L'inversion permet de localiser les polluants et constitue une zone potentielle de polluants en concentrations particulièrement élevées dans une région donnée. Expliquons brièvement ce phénomène.

En règle générale, la température de l'air diminue de $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ au fur et à mesure que l'altitude augmente. Par exemple, une particule d'air propulsée dans l'atmosphère à partir d'une source de pollution à la surface de la terre se dilate et refroidit au cours de sa montée en raison de la détente adiabatique. Si la température de l'atmosphère ambiante est plus basse que celle de la particule d'air, celle-ci garde sa légèreté et a tendance à poursuivre son ascension. Cette instabilité se produit lorsque l'atmosphère se refroidit plus rapidement que le gradient adiabatique qui est d'environ $9,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Par contre, si la température de l'atmosphère est plus élevée que celle de la particule d'air qui se dilate et se refroidit, cette dernière a une poussée négative et a tendance à ralentir sa course et à se stabiliser, et la vitesse de diffusion verticale est par conséquent très réduite. Ce phénomène est particulièrement prononcé lorsque la température de l'atmosphère augmente avec l'altitude, c'est-à-dire s'inverse. Les particules d'air polluées se trouvent emprisonnées et ne peuvent s'étaler verticalement par le mouvement turbulent à grande échelle.

Les fortes inversions sont assez rares dans les régions du sud et sont généralement attribuables à des conditions météorologiques inhabituelles ou à un refroidissement nocturne des couches inférieures de l'atmosphère. Dans l'Arctique, elles sont très fréquentes en hiver, en raison du faible rayonnement solaire. Le sol et l'air immédiatement en contact avec celui-ci deviennent beaucoup plus froids que la masse d'air plus élevée et la température de l'air augmente donc avec l'altitude. Ce phénomène se produit particulièrement lorsque la vitesse des vents est faible. Munn *et al.*, (1970) ont étudié la fréquence des inversions au sol à différentes stations au Canada. Leurs conclusions, illustrées aux figures 4, 5 et 6, révèlent que pendant les observations par radiosondage-radiovent, la fréquence des inversions dans la région de la mer de Beaufort est assez similaire à celle observée dans le sud. Les inversions peuvent toutefois persister plus longtemps dans l'Arctique; la couche de brassage y est moins élevée en raison de l'insolation plus faible, notamment en hiver. Les niveaux de pollution enregistrés, en hiver, dans les régions urbaines de l'Alaska, par exemple à Fairbanks, corroborent cette affirmation. Une étude complémentaire de Shaw *et al.*, (1972) révèle la persistance de faibles vents de surface qui contribuent également à accroître la pollution.

Portelli (1977), dans une publication récente portant sur ce sujet, a compilé des données sur les couches de brassage et les coefficients de ventilation dans tout le Canada.

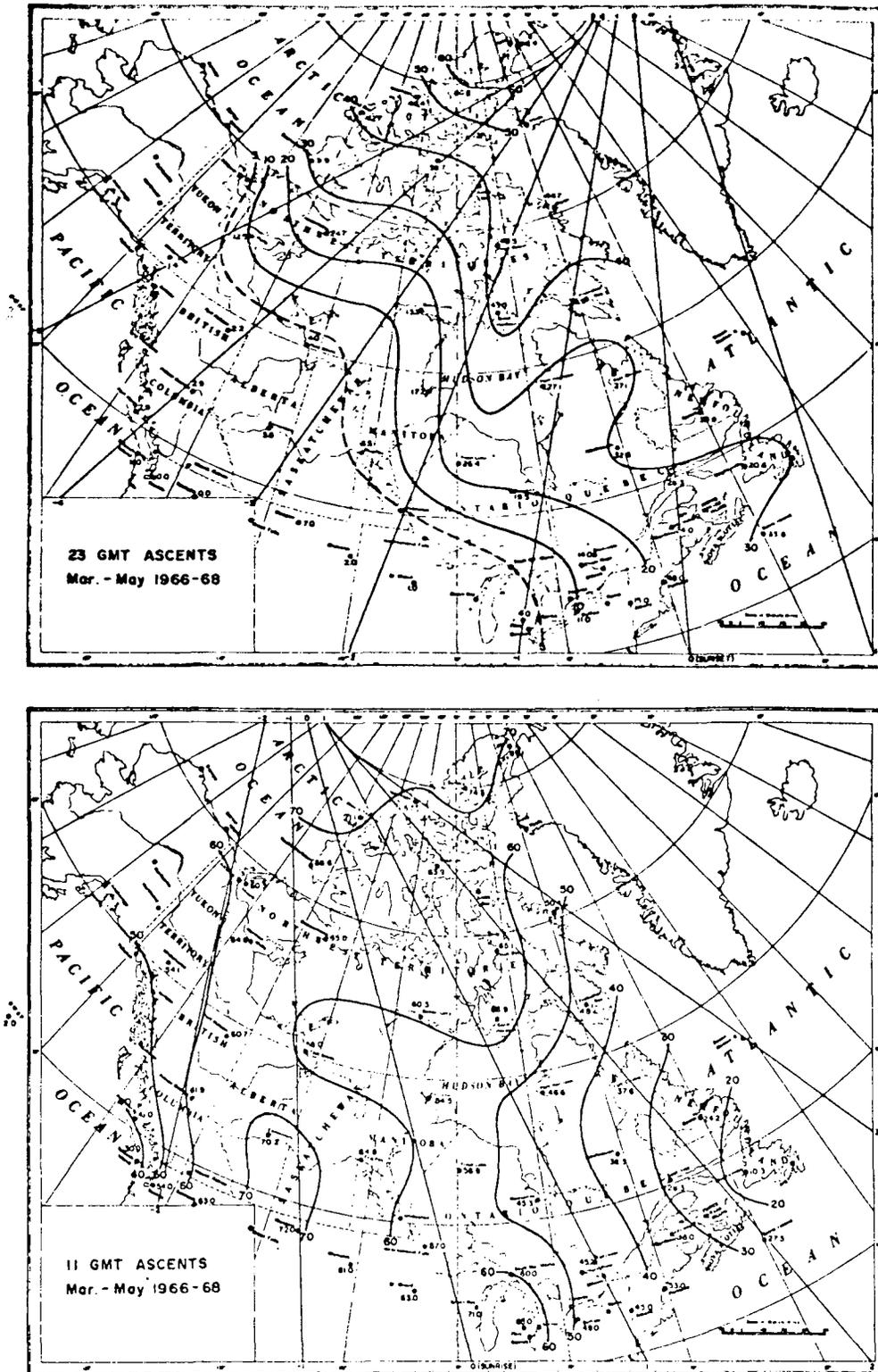


FIGURE 4 FRÉQUENCES DES INVERSIONS AU SOL (%)

Source: Munn *et al.*, (1970)

Les heures de la journée, par rapport au coucher et au lever du soleil, sont représentées par des lignes droites fines dans la figure supérieure ou inférieure respectivement.

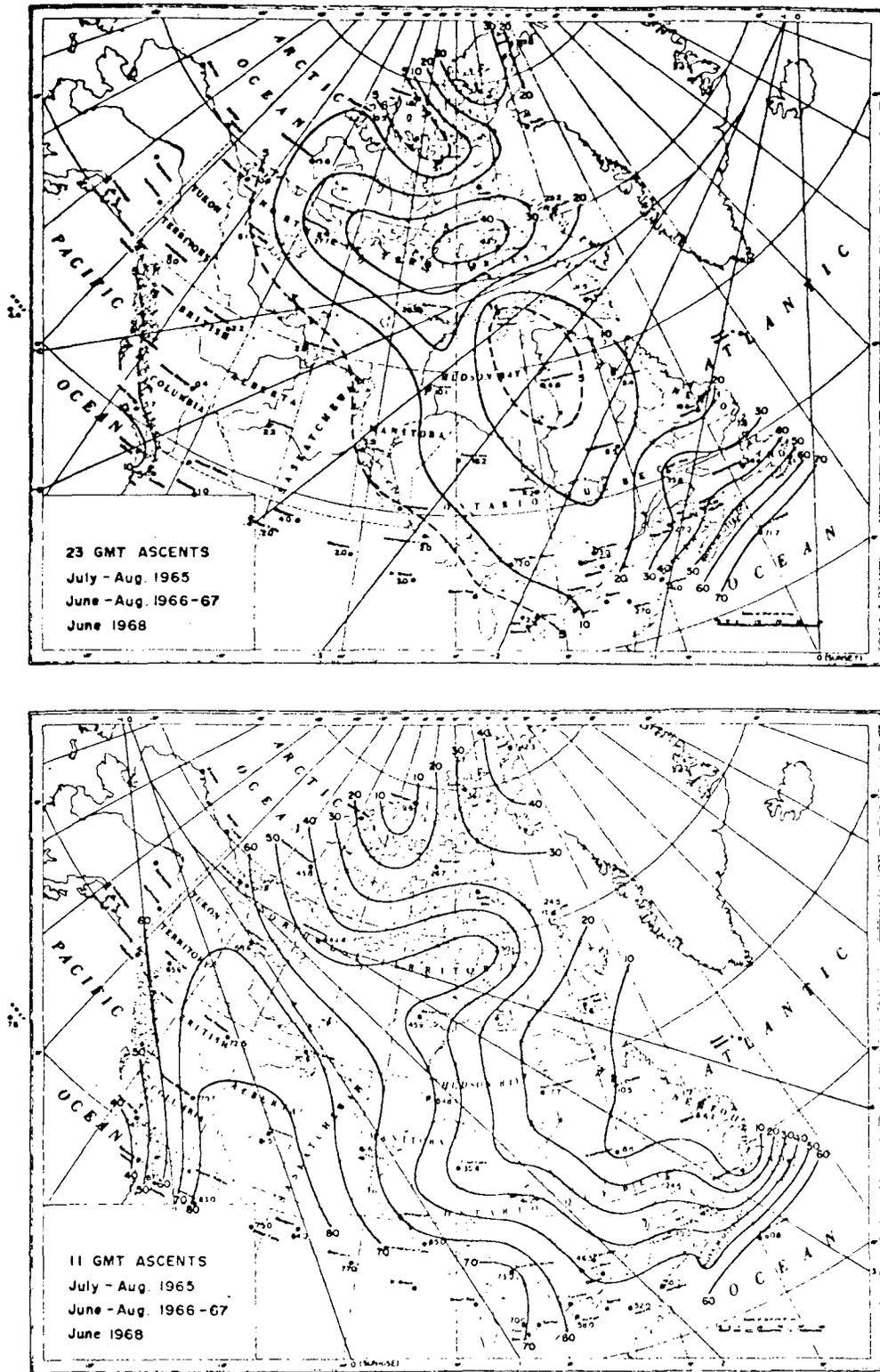


FIGURE 5 FRÉQUENCES DES INVERSIONS AU SOL (%)

Source: Munn et al., (1970)

Les heures de la journée, par rapport au coucher et au lever du soleil, sont représentées par des lignes droites fines dans la figure supérieure ou inférieure respectivement.

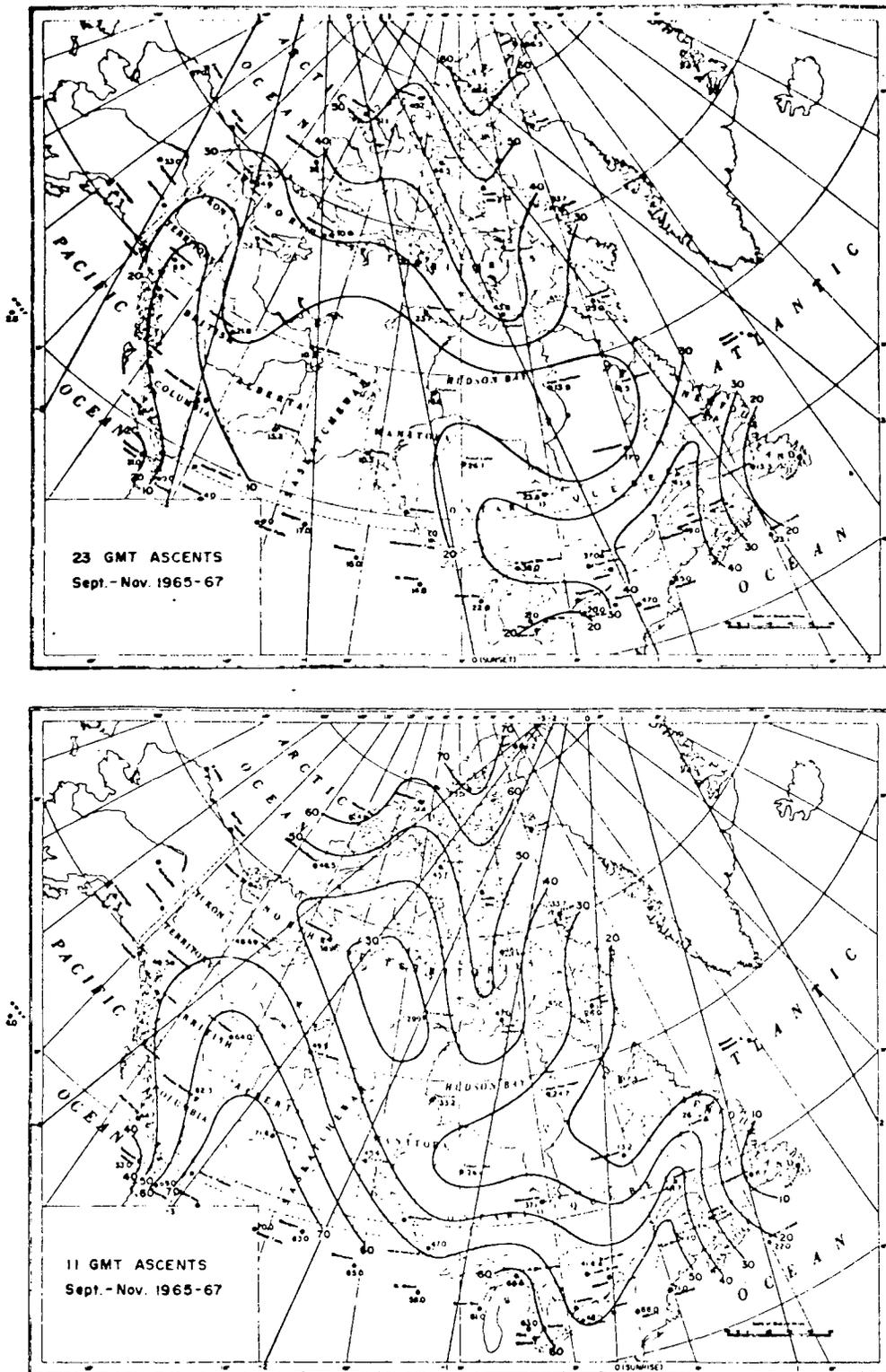


FIGURE 6 FRÉQUENCES DES INVERSIONS AU SOL (%)

Source: Munn et al., (1970)

Les heures de la journée, par rapport au coucher et au lever du soleil, sont représentées par des lignes droites fines dans la figure supérieure ou inférieure respectivement.

La notion de couche de brassage est essentielle à cette étude et exige certaines explications. La couche de brassage maximale (ou d'après-midi) représente l'altitude à laquelle la détente adiabatique sèche de la température maximale en surface coupe le profil vertical des températures observées à 1200 TMG. La température maximale en surface est déterminée d'après des observations locales, tandis que le profil vertical des températures est obtenu à partir d'observations par radiosondage-radiovent. Une couche de brassage à faible altitude, par exemple à 300 m, implique que les caractéristiques des 300 premiers mètres de l'atmosphère sont telles que l'air pollué ne peut dépasser une altitude de 300 m par sa propre poussée. Ainsi, il est réellement freiné par un plafond ou un couvercle à cette hauteur. Il peut évidemment franchir cette barrière grâce à une forte poussée causée par la chaleur, une longueur cheminée ou une vitesse d'émission élevée. En principe, la couche de brassage représente la hauteur réelle sous laquelle les inversions permettent de freiner les panaches de fumée. Plus l'altitude est faible, plus la fumée est confinée et plus les concentrations sont élevées. Ce phénomène est illustré à la figure 7.

Le coefficient de ventilation, produit calculé de la couche de brassage maximale par la vitesse moyenne des vents dans la couche de mélange, est le deuxième critère établi par Portelli (1977). Les unités de ce produit sont données en $\text{m}^3 \times \text{s}^{-1} \times \text{m}^{-1}$ ou en m^2/s et représentent la vitesse à laquelle l'air de la région est ventilé. Une petite valeur indique que les conditions atmosphériques sont telles que l'air contaminé persiste plus longtemps dans la région et que les concentrations de polluants peuvent être plus élevées en raison de la lente dilution.

Les figures 8 à 13, tirées de l'étude de Portelli (1977), indiquent les données sur la couche de brassage et le coefficient de ventilation pour le Canada. Il ressort nettement que dans la région de la mer de Beaufort, les risques de pollution atmosphérique sont beaucoup plus élevés et probablement plus graves que dans la plupart des autres régions canadiennes. En été, les couches de brassage moyennes varient généralement entre 400 et 600 m environ, contrairement à d'autres régions telles que l'Ontario où elles s'élèvent à 1300 m environ. Des conditions semblables sont observées à l'automne. Au printemps et en automne, les vitesses moyennes des vents dans la mer de Beaufort et en Ontario sont similaires; les coefficients de ventilation dans la mer de Beaufort sont donc plus petits en

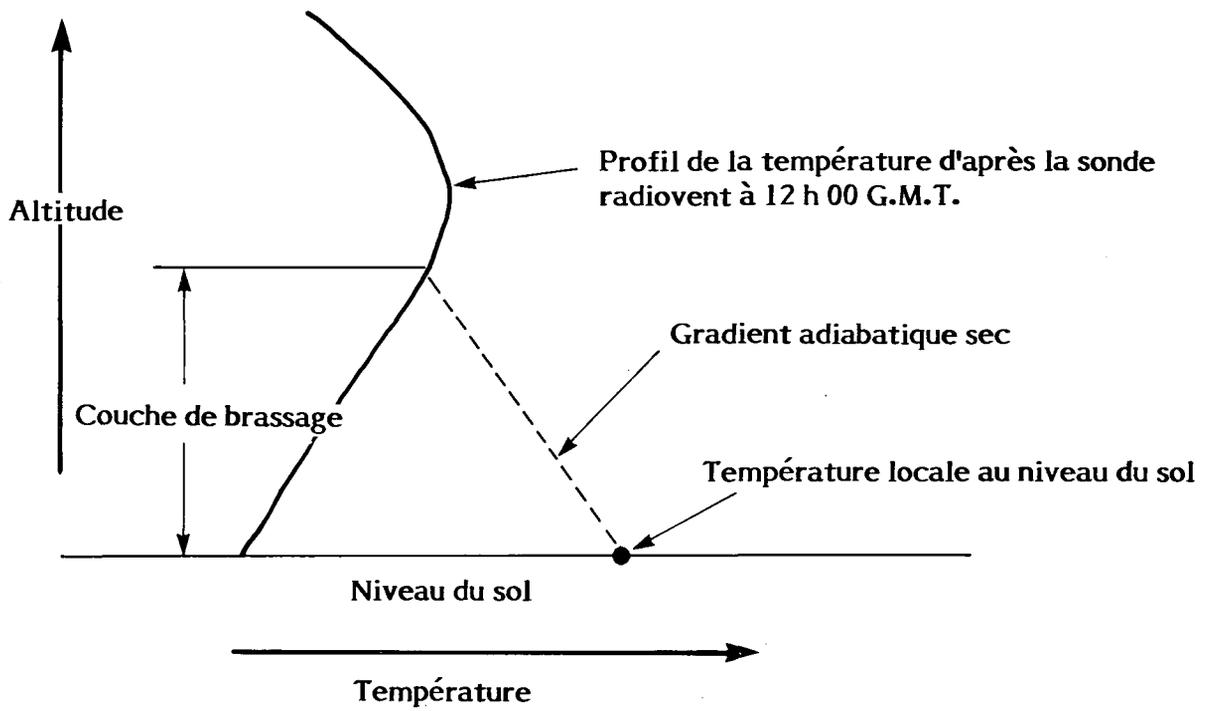


FIGURE 7 COUCHE DE BRASSAGE

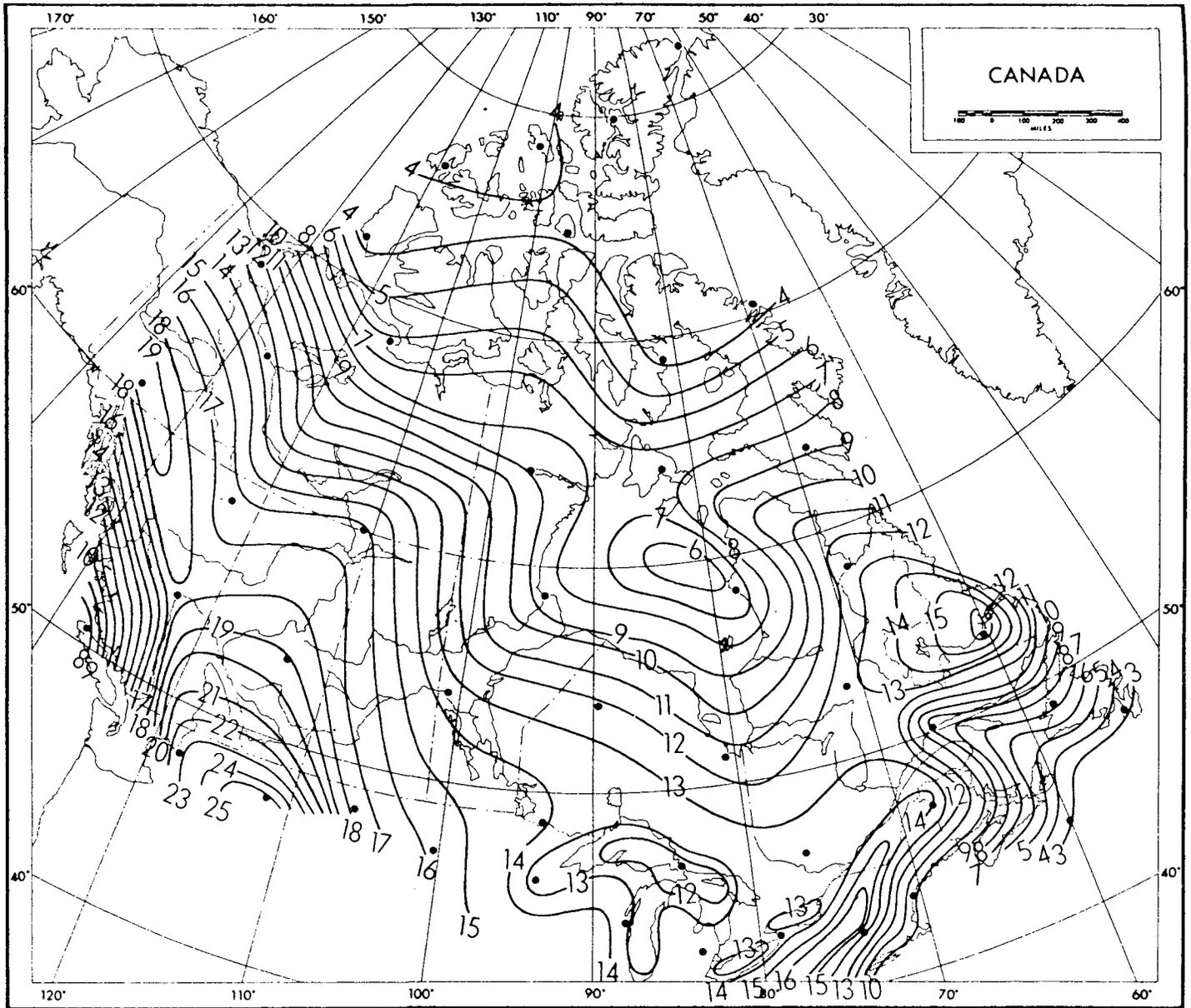


FIGURE 8 ISOPLÈTHES ($m \times 10^2$) DES COUCHES DE BRASSAGE
 MAXIMALES MOYENNES (APRÈS-MIDI) EN ÉTÉ
 Source: Portelli (1977)

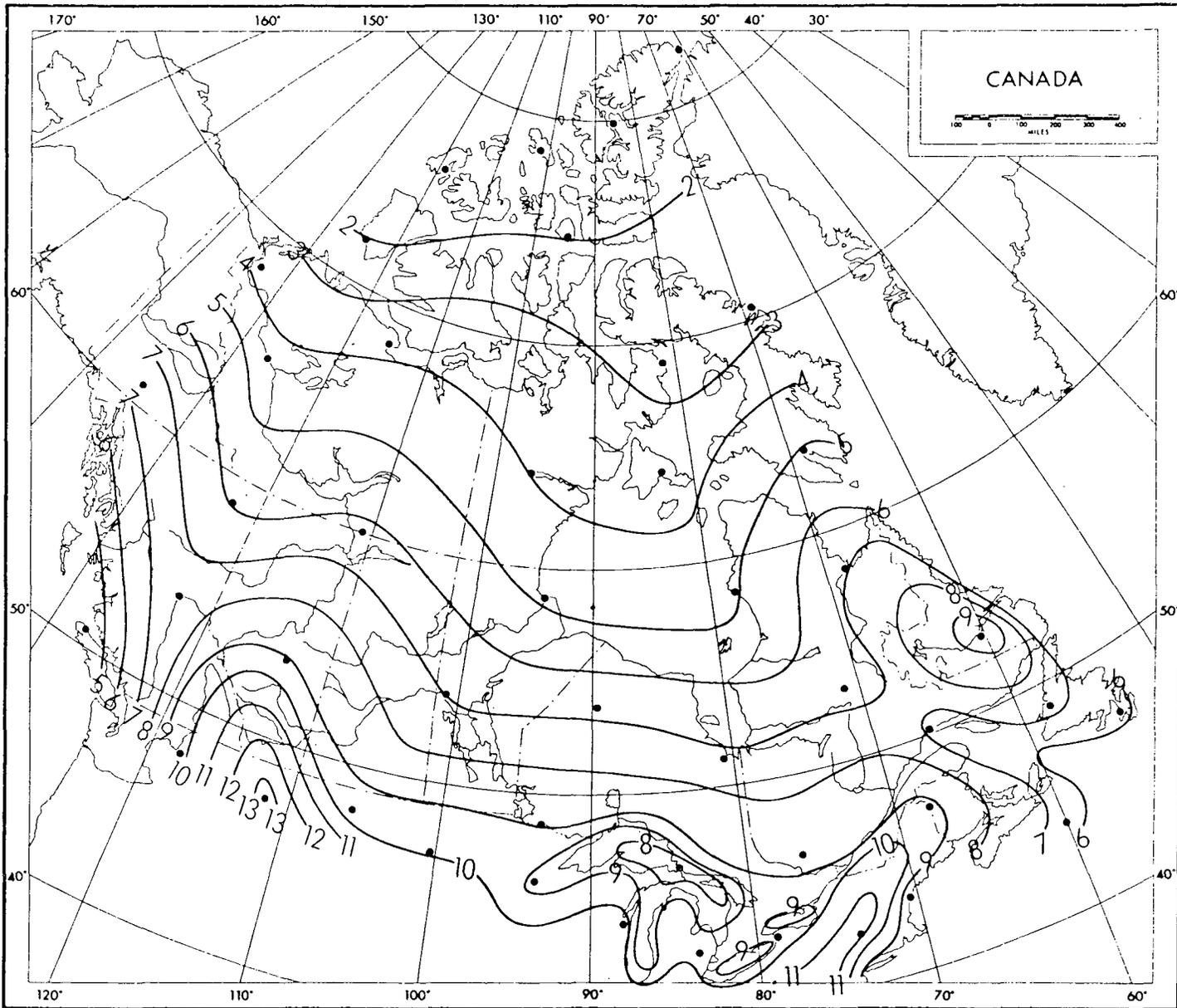


FIGURE 9 ISOPLÈTHES ($m \times 10^2$) DES COUCHES DE BRASSAGE
 MAXIMALES MOYENNES (APRÈS-MIDI) EN AUTOMNE
 Source: Portelli (1977)

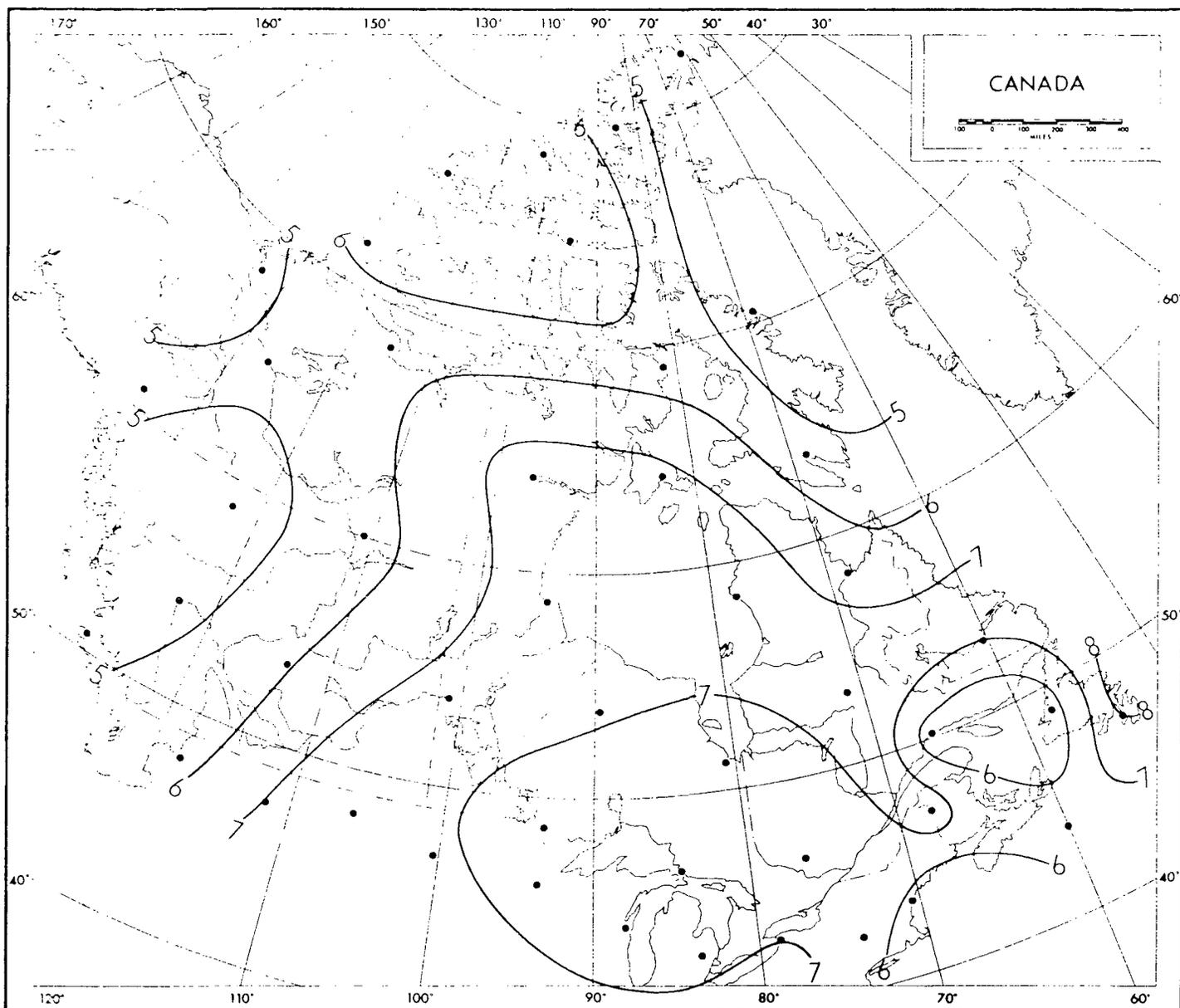


FIGURE 10 ISOPLÈTHES ($m \times s^{-1}$) DE LA VITESSE MOYENNE
DES VENTS, EN ÉTÉ, PONDÉRÉS DANS LA COUCHE
DE BRASSAGE MAXIMALE (APRÈS-MIDI)

Source: Portelli (1977)

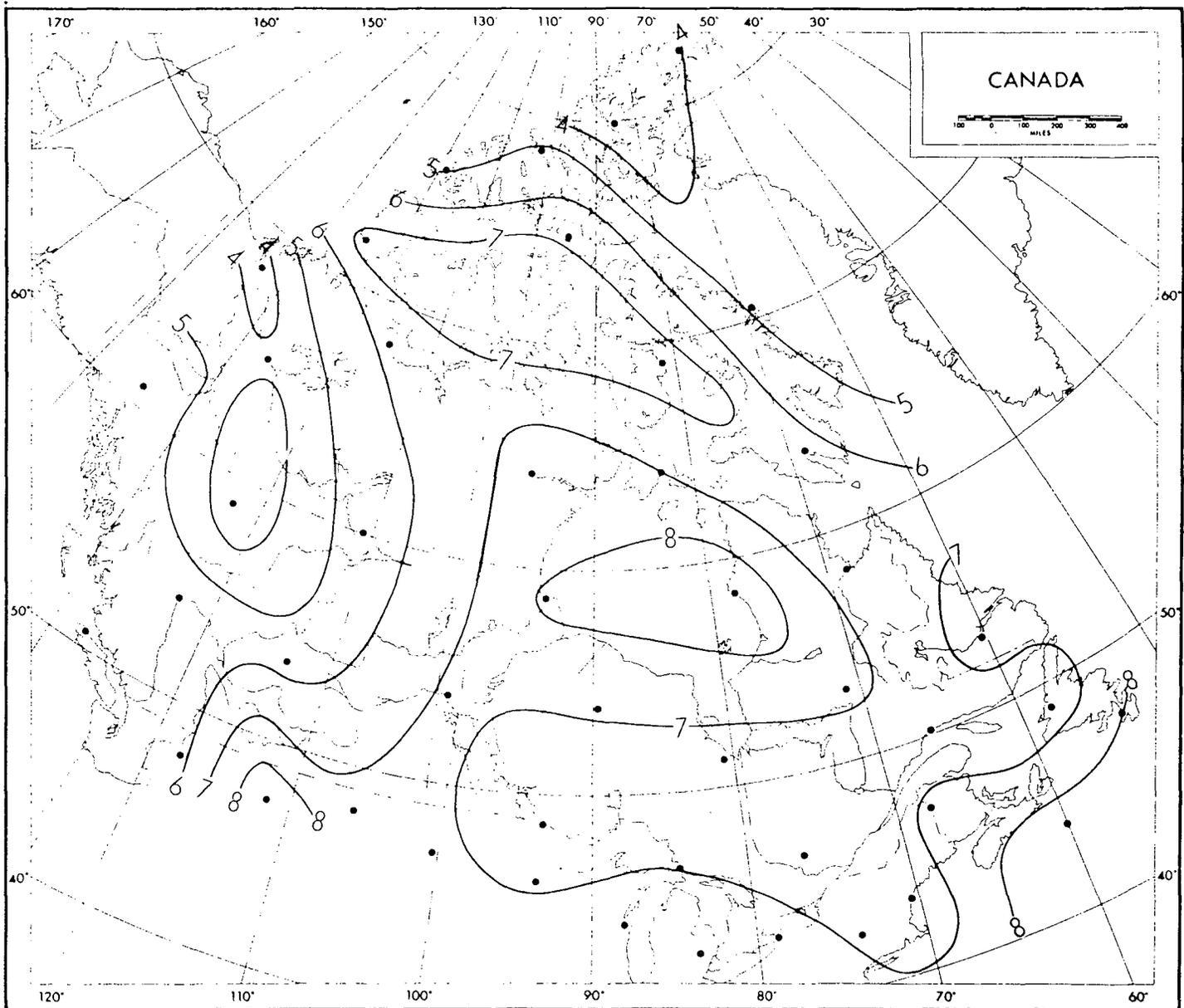


FIGURE 11 ISOPLÈTHES ($m \times s^{-1}$) DE LA VITESSE MOYENNE
 DES VENTS, EN AUTOMNE, PONDÉRÉS DANS LA COUCHE
 DE BRASSAGE MAXIMALE (APRÈS-MIDI)
 Source: Portelli (1977)

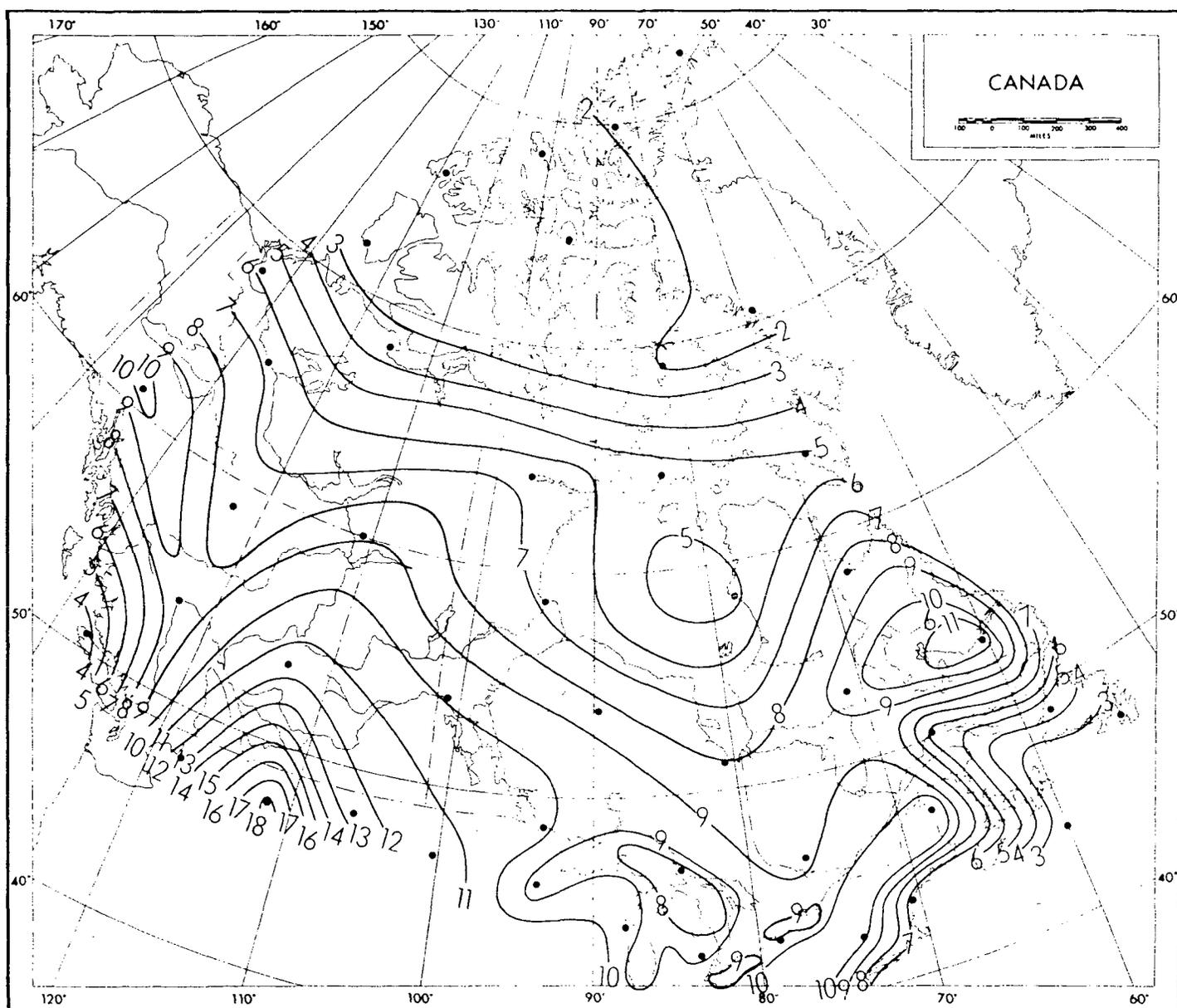


FIGURE 12 ISOPLÈTHES ($\text{m}^2 \times \text{s}^{-1} \times 10^3$) DES COEFFICIENTS DE VENTILATION
 MAXIMAUX MOYENS (APRÈS-MIDI) EN ÉTÉ
 Source: Portelli (1977)

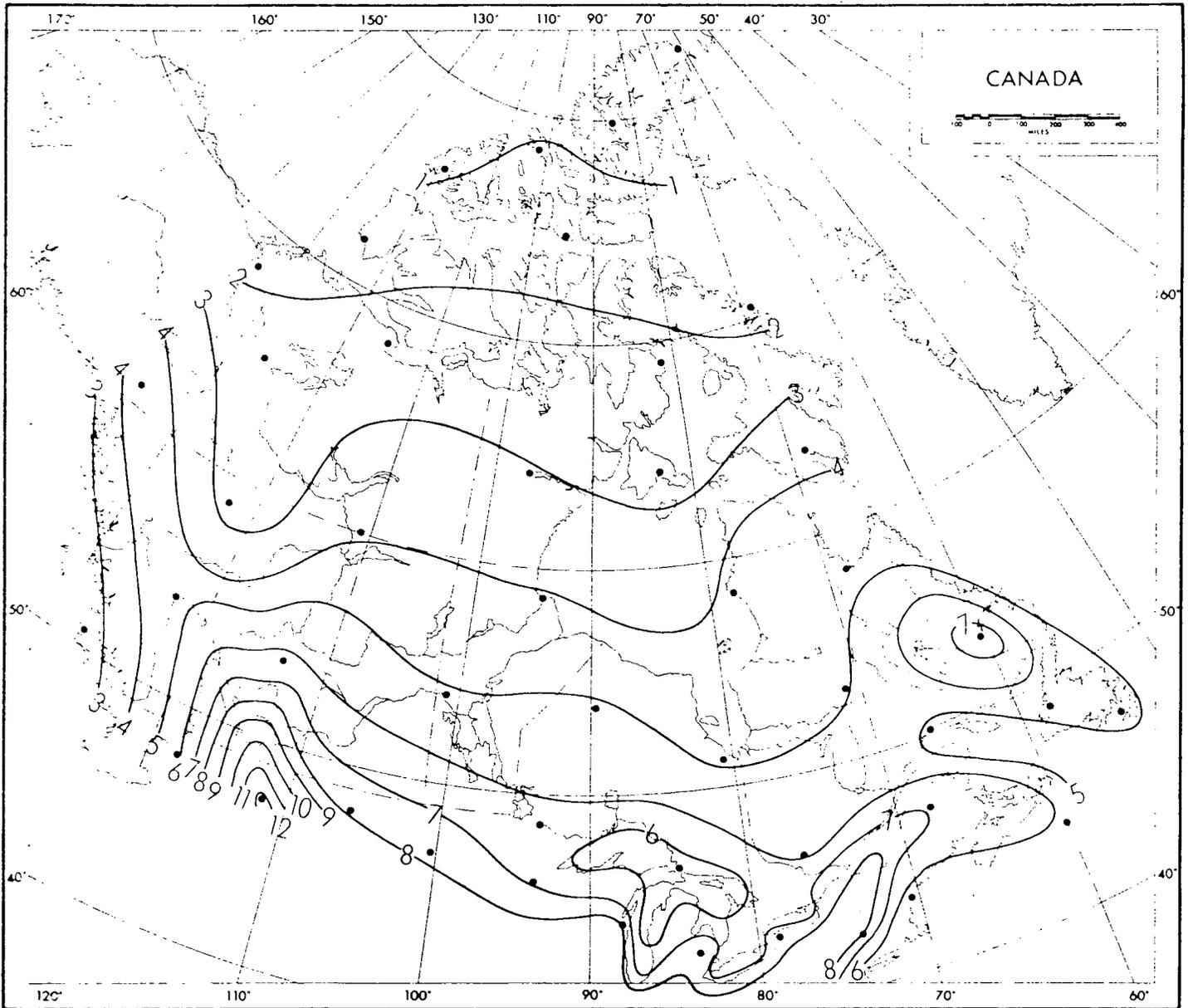


FIGURE 13 ISOPLÈTHES ($\text{m}^2 \times \text{s}^{-1} \times 10^3$) DES COEFFICIENTS DE VENTILATION MAXIMAUX MOYENS (APRÈS-MIDI) EN AUTOMNE
Source: Portelli (1977)

raison de l'altitude moins élevée de la couche de brassage. Même si ces données sont très simplifiées, on peut affirmer que les conditions dans la mer de Beaufort sont généralement telles que la région est trois ou quatre fois moins aérée que l'Ontario ou le centre de l'Alberta.

La vitesse des vents est un autre paramètre atmosphérique essentiel au calcul de la dispersion de la fumée. Il est impossible de prévoir avec quelque certitude les vents dominants pendant une période de combustion du pétrole. Toutefois, les probabilités indiquent qu'en juin, les vents sont du secteur est-sud-est, avec une fréquence de près de 25 p. 100, ou du secteur ouest-nord-ouest avec une fréquence de près de 15 p. 100. Les probabilités sont plus faibles pour les autres directions. En septembre, la situation est semblable, mais les vents sont plutôt du secteur ouest-nord-ouest (Burns, 1973).

La vitesse moyenne des vents à Cape Parry, en juin, est d'environ 19 km/h (12 mi/h) et marque une légère augmentation, soit 21 km/h (13 mi/h) environ en septembre. Les chiffres correspondants pour Inuvik sont plus faibles: 13 km/h (8 mi/h) et 11 km/h (7 mi/h) respectivement. L'écart type de la vitesse des vents à Cape Parry est d'environ 13 km/h (8 mi/h) et de 7 km/h (4 mi/h) à Inuvik. Il est donc probable qu'en juin, la vitesse des vents variera entre 7 et 32 km/h (4 et 20 mi/h) si les conditions à Cape Parry sont caractéristiques de celles de la mer de Beaufort.

Pour calculer les concentrations de polluants sous le vent à partir d'une source émettrice, il faut calculer séparément la hauteur du panache et sa dispersion. La fumée et les gaz de combustion produits par l'incendie sont dirigés vers le haut du fait de leur légèreté par rapport à l'atmosphère ambiante. Ils peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres. Cette hauteur dépend de la légèreté du panache et de la force des vents dominants. Diverses équations peuvent être utilisées pour calculer la montée du panache. Elles ont été étudiées dans des textes normalisés sur la pollution atmosphérique, rédigés par exemple par Steinfeld (1975) Williamson (1973), et dans l'ouvrage de Turner (1974). Les équations utilisées dans le présent rapport sont décrites en détail dans l'annexe A. La hauteur du panache est donnée à la figure 14.

Lorsque la poussée du panache est nulle, ce dernier est généralement transporté sous le vent par les vents dominants. Sa diffusion peut être horizontale, verticale ou latérale. Les calculs de la dispersion du panache sont étudiés en détail dans les ouvrages

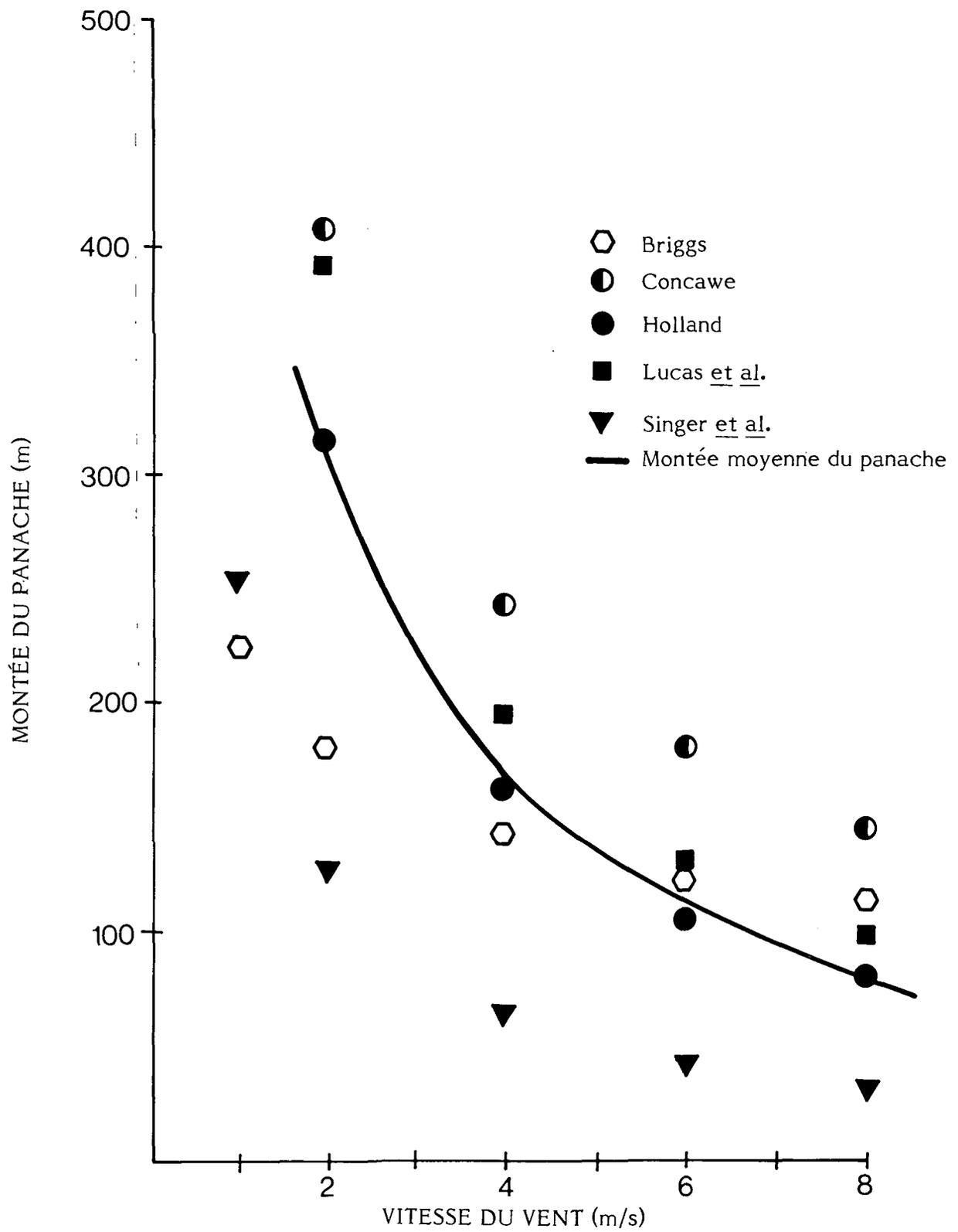


FIGURE 14 HAUTEUR DU PANACHE EN FONCTION DE LA VITESSE DES VENTS

mentionnés plus haut; une analyse complète de ce thème dépasse l'objet du présent rapport. Il faut s'assurer que la dispersion du panache se fait d'une façon gaussienne avec un écart type croissant, σ . Les valeurs de σ pour une diffusion verticale et latérale sont différentes et dépendent de la distance parcourue sous le vent (c'est-à-dire la durée de diffusion) et de la turbulence inhérente présente dans l'atmosphère. Cette dernière valeur est difficile à déterminer, mais on utilise généralement cinq niveaux de stabilité cotés de A (très grande instabilité et diffusion rapide) à F (très grande stabilité). Dans le présent rapport, le comportement du panache a été évalué pour des niveaux B, D, E et F. Les valeurs de σ utilisées ici sont tirées de Turner (1974).

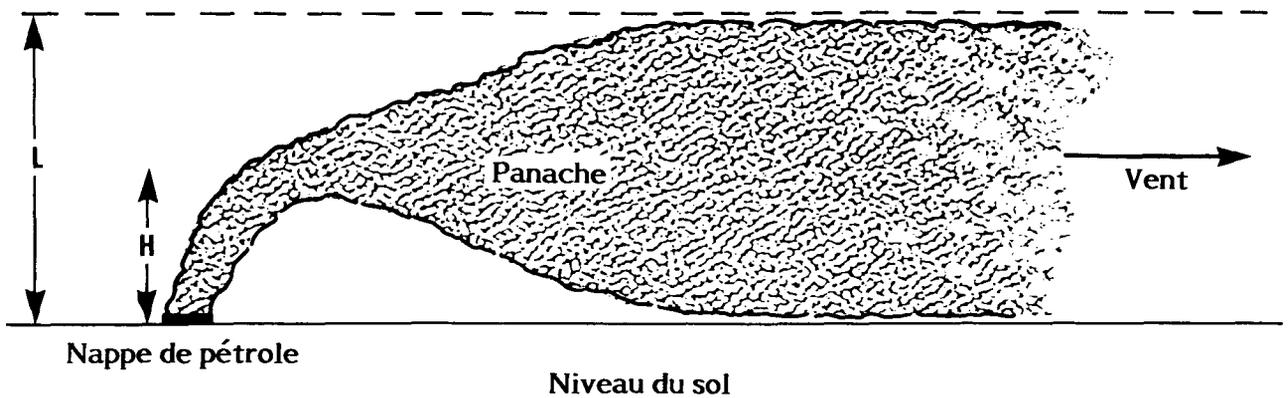
Les équations tiennent compte de la hauteur du panache, de la direction du vent, du niveau de stabilité (B à F) et de la quantité de polluants émise; elles peuvent servir à évaluer la concentration de polluants gazeux en tout point sous le vent.

La figure 15 indique la dispersion probable du panache si la hauteur du panache (H) est inférieure à la couche de brassage. Le panache est emprisonné sous le dôme d'inversion et s'étale verticalement et latéralement pour occuper tout le volume. La figure 16 illustre le comportement probable si la poussée du panache lui permet d'atteindre le sommet de la couche de brassage.

Le panache peut alors s'étaler verticalement mais essentiellement vers le haut, puisque le plafond freine ou diminue sa diffusion descendante. Si la hauteur du panache (H) et la couche de brassage (L) sont égales, le panache prendra la forme d'un éventail au sommet de la couche et se diffusera un peu vers le bas.

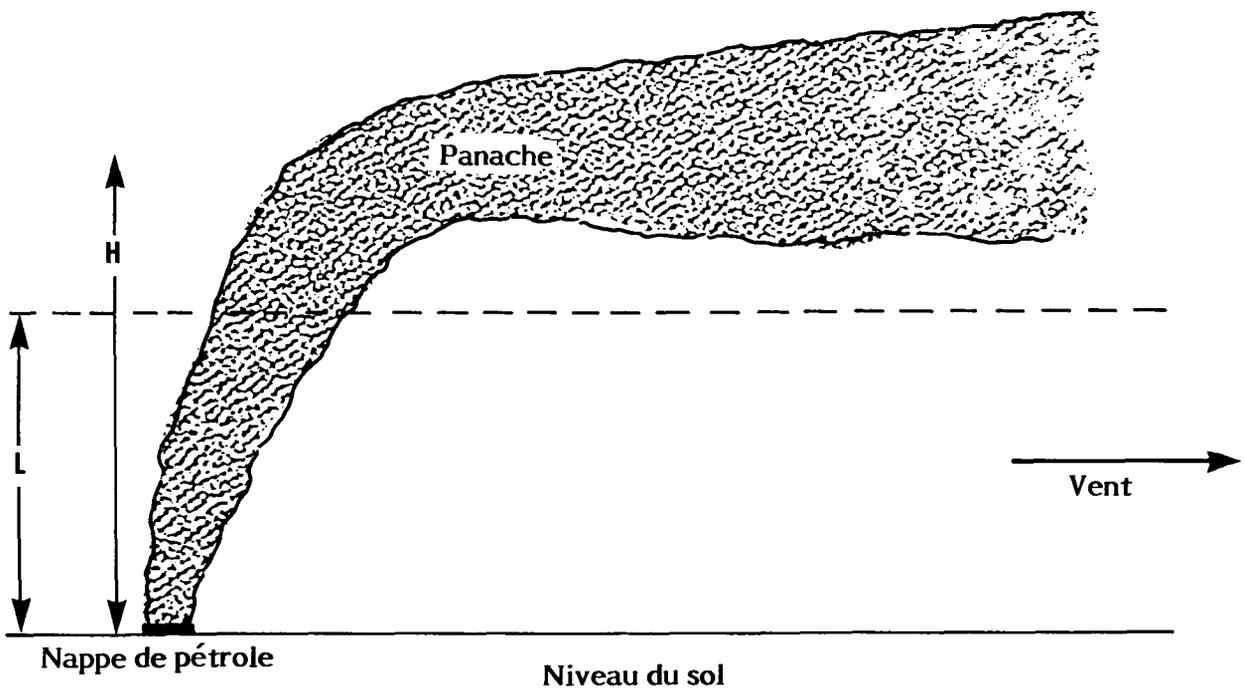
Il est intéressant et important d'analyser le comportement du panache par vent nul. Les équations applicables à la diffusion du panache ne sont pas valables dans ce cas. La figure 17 illustre un comportement possible, soit la formation d'un champignon et sa lente dispersion. Les conditions à proximité du panache sont probablement assez mauvaises.

Dans ces calculs, la source est supposée constante ou continue par souci de simplification mathématique. Il n'y a donc pas de diffusion contre ou sous le vent, et il se forme un panache de fumée au cours d'une combustion de 60 minutes (1 h) sur $1,0 'U'$ km, ou 'U' est la vitesse du vent (km/h). Le panache aurait donc une longueur de 15 km, pour



Hauteur de la montée du panache < Hauteur de la couche de brassage (Panache circonscrit)

FIGURE 15 CONFINEMENT D'UN PANACHE DANS UNE COUCHE DE BRASSAGE



Hauteur de la montée du panache > Hauteur de la couche de brassage (Panache arrêté en haut)

FIGURE 16 PÉNÉTRATION DU PANACHE DANS LE PLAFOND
D'UNE COUCHE DE BRASSAGE

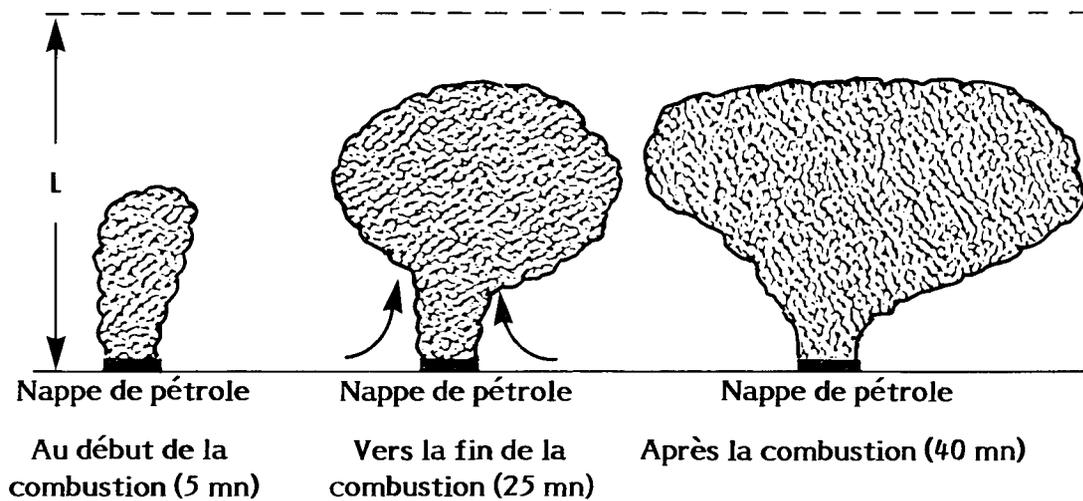


FIGURE 17 COMPORTEMENT POSSIBLE DU PANACHE PAR VENT NUL

un vent de 15 km/h, balaierait la région et continuerait sa diffusion verticale (jusqu'à ce qu'il atteigne le dôme) et latérale.

Le problème se complique d'autant plus que les matières particulaires (la suie) sont non seulement soumises à la diffusion, mais également à la vitesse de décantation descendante qui dépend de la densité et de la dimension des particules. Il n'a pas été possible d'obtenir d'informations sur les caractéristiques de la suie du pétrole brut. Certaines expériences en laboratoire ont été entreprises pour déterminer les caractéristiques approximatives de la suie (section 2.1.2). Le dépôt de la suie a été pris en considération dans les calculs effectués selon la méthode exposée à l'annexe C.

Les auteurs soulignent que les résultats de ces calculs donnent lieu à un nombre considérable d'hypothèses. Toutefois, ils estiment qu'il est valable à ce stade d'émettre des hypothèses, de tirer des conclusions puis de vérifier leur adéquation, en vue de déterminer s'il faut obtenir des données expérimentales plus précises.

Les concentrations, prévues par le modèle de dispersion, ont été établies d'après une source d'émission continue et des échantillonnages prélevés toutes les demi-heures. La durée d'émission, utilisée dans les calculs, est inférieure à celle de l'échantillonnage et les concentrations prévues sont considérées comme des estimations prudentes (élevées) des niveaux des polluants.

1.5 Composition du pétrole

La nature chimique exacte des pétroles bruts provenant de l'Arctique canadien restera évidemment inconnue tant que les réservoirs n'auront pas été délimités et que les hydrocarbures types n'auront pas été analysés. Il est nécessaire, toutefois, de formuler certaines hypothèses sur la composition du pétrole.

La volatilité ou la "légèreté" du pétrole détermine la facilité d'allumage et le pourcentage de pétrole imbrûlé; toutefois cette caractéristique présente peu d'intérêt dans l'étude actuelle. Ce qui est plus important, ce sont les quantités de matières autres que les hydrocarbures, soit le soufre et les métaux lourds. Le tableau 2, qui est la reproduction du tableau B6 du rapport Norcor (1977), donne des analyses du soufre et des métaux contenus dans les échantillons de pétrole brut non altéré provenant de Norman

TABLEAU 2 ANALYSE DES MÉTAUX CONTENUS DANS LES ÉCHANTILLONS DE PÉTROLE BRUT NON ALTÉRÉ

	Norman Wells	Swan Hills
Soufre	1,76 p. 100	2,90 p. 100
Aluminium (Al_2O_3)	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
Baryum	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
Calcium ($CaCO$)	< 0,5 ppm	5 ppm
Cuivre	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
Fer (Fe)*	0,3 ppm	0,3 ppm
Plomb	0,5 ppm	20 ppm
Magnésium (MgO)	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
Nickel	1 ppm	< 0,5 ppm
Silicium (SiO_2)	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
Sodium (Na_2O)	< 1 ppm	1 ppm
Étain	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
Vanadium	3 ppm	< 0,5 ppm
Zinc*	-	20 ppm

* Les valeurs du fer et du zinc peuvent être faussées par suite de la contamination des contenants de métal.

Wells et Swan Hills. Ces données laissent entrevoir que les éléments importants autres que les hydrocarbures sont le soufre, dans une proportion possible de 2 p. 100 environ; le vanadium dans une proportion possible d'environ trois ppm; le plomb et le zinc, 20 ppm; et le nickel, une ppm. Les autres éléments comme le calcium, le fer, le sodium, l'aluminium, le baryum et le magnésium ne sont généralement pas considérés comme toxiques.

Des informations ont également été fournies par la Compagnie pétrolière Impériale Limitée sur le pétrole brut de Norman Wells, et révèlent une teneur en soufre d'environ 0,34 p. 100 en poids. En outre, le H_2S avait une concentration d'environ 21 lb/1000 barils (c'est-à-dire, moins de 0,01 p. 100). Aucune analyse de métal n'a été communiquée.

Les métaux les plus importants trouvés habituellement dans le pétrole brut sont le vanadium et le nickel. Le projet de recherche 56 de l'American Petroleum Institute intitulé "Trace Metal Constituents in Petroleum" (Sugihara, 1962) a donné lieu à un certain nombre d'études au cours desquelles plusieurs métaux ont été identifiés et leurs concentrations établies. La concentration du vanadium peut atteindre jusqu'à 1000 ppm environ; la concentration du nickel est considérablement inférieure.

Il existe très peu de données sur l'état chimique de ces métaux. Ils sont probablement combinés sous une certaine forme complexe organométallique avec la fraction d'asphaltènes du pétrole; par conséquent les métaux auront tendance à s'accumuler dans la fraction non volatile. Cela ne signifie pas nécessairement que les métaux ne s'évaporeront pas puisque, comme il a été établi antérieurement, certains hydrocarbures liquides seront propulsés dans la zone de combustion. Les métaux contenus dans le pétrole seront sans aucun doute convertis en particules et seront déposés avec les matières particulaires dans le sens du vent. Heureusement, ni le vanadium ni le nickel ne sont considérés comme des éléments particulièrement toxiques. L'état d'oxydation de ces métaux au moment de leur émission de la combustion est actuellement inconnu. Il faudrait faire des recherches pour déterminer si les fortes concentrations de plomb et de zinc sont caractéristiques du pétrole de Swan Hills.

2 EXPÉRIENCES

2.1 Études en laboratoire de la combustion du pétrole

2.1.1 Équipement et mode opératoire.— Un petit appareil de laboratoire a été monté en vue d'entreprendre certaines études des caractéristiques de la combustion du pétrole. L'appareil a été conçu et construit de manière à pouvoir soumettre une quantité connue de pétrole à la combustion, alimentée par un taux d'air connu, et à pouvoir recueillir les produits de la combustion. Un diagramme schématique de l'appareil est donné à la figure 18.

L'appareil comprenait une colonne de verre de 15,2 cm de diamètre et de 45,7 cm de haut, munie à la base d'une extrémité hémisphérique. Cette base contenait un lit de sable qui supportait un récipient circulaire de laiton de 8,9 cm de diamètre et de 1,3 cm d'épaisseur. Ce récipient pouvait contenir une quantité de pétrole, jusqu'à une profondeur maximale de 0,75 cm. Un fil de nichrome servait à enflammer le pétrole. Une pompe alimentait de l'air à un débit contrôlé à l'aide d'un débitmètre à diaphragme. Des thermocouples de Chromel-alumel servaient à enregistrer les températures du récipient, du pétrole et de diverses autres sections de la colonne. Un filtre à aspiration a été connecté à la partie supérieure de l'appareil pour recueillir la suie produite. Un système permet de faire varier la température du récipient par une circulation d'eau à température contrôlée dans un serpentin à la base du récipient.

Une quantité connue de pétrole a été mise dans le récipient. Le passage de l'eau dans les serpentins du récipient de laiton a permis de régler la température du récipient et du pétrole aux degrés voulus. Le pétrole a alors été enflammé à l'aide du fil de nichrome. Au cours de la combustion, les températures du pétrole, du récipient et de diverses sections de la flamme ont été enregistrées. Une fois la combustion terminée, le poids du résidu dans le récipient a été établi. La masse de suie recueillie dans le filtre a été mesurée en soustrayant le poids du papier du filtre plus la suie du poids du papier pesé au préalable et le bilan de masse approximatif a été calculé. Des microphotographies des particules de suie ont également été prises pour obtenir des données sur leur dimension en vue de calculer les vitesses de décantation.

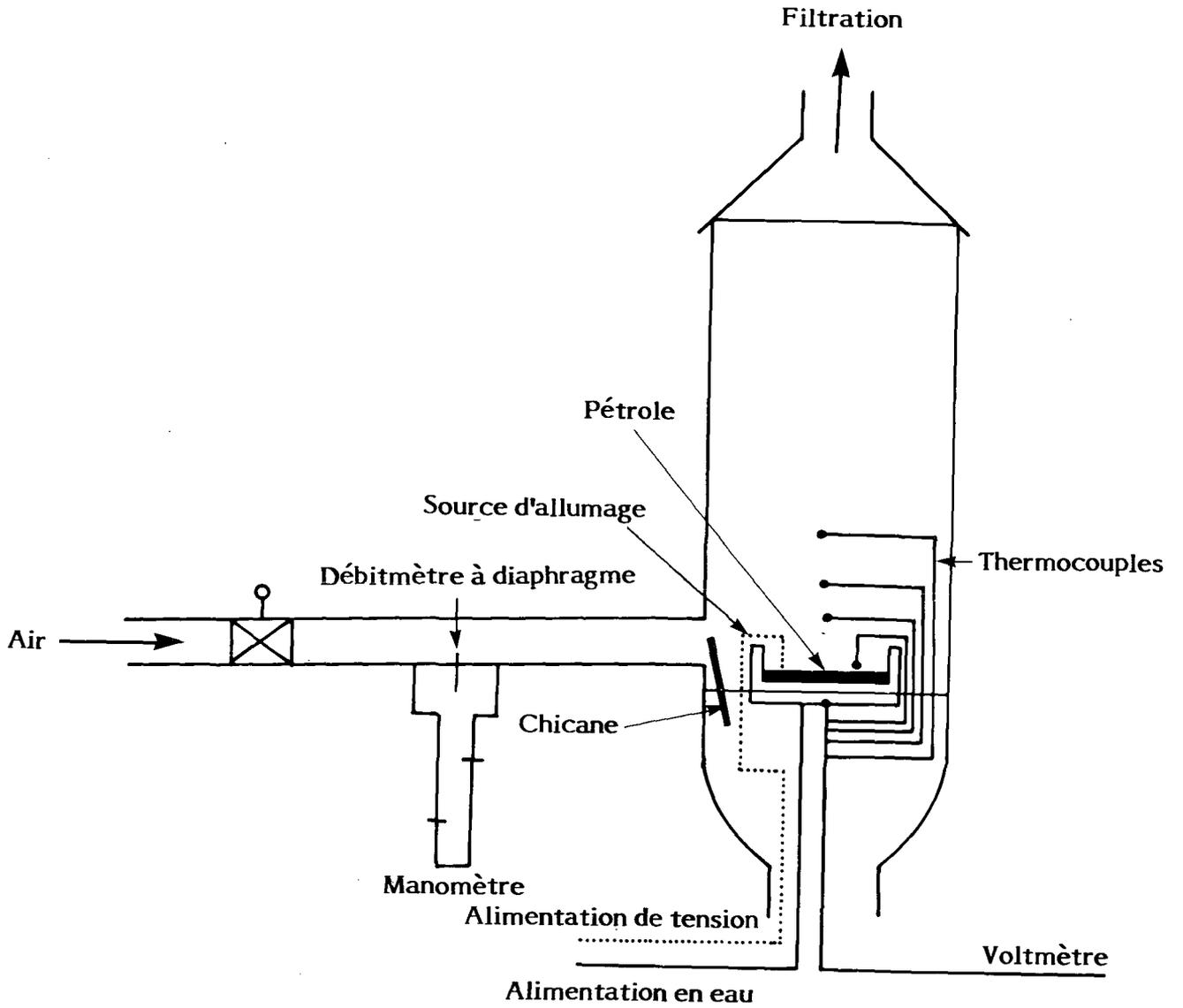


FIGURE 18 APPAREIL

Des échantillons du pétrole original, du résidu et de la suie ont été analysés pour déterminer la teneur en vanadium en vue d'établir les proportions de ce métal dans les émissions. L'analyse par activation neutronique a été réalisée par des instruments.

Sept déterminations de la composition des gaz ont été effectuées dans l'appareil au cours de la combustion du pétrole afin d'évaluer les substances O_2 , N_2 , CO_2 , CO et autres pics. La surface sous ces pics établis par un détecteur de conductivité thermique CPG donnait un rapport moyen CO_2/CO de 21.2:1, avec des valeurs variant considérablement entre 7.9:1 et 43.1:1. On suppose que le rapport molaire est de 20:1. Le CO produit se comportera comme le SO_2 au cours de la dispersion; il est donc possible d'estimer les concentrations de CO en fonction de celles de SO_2 .

2.1.2 Microphotographie de la suie.- Dans les calculs de dispersion, il est essentiel de définir la vitesse de décantation des matières particulaires. Cette vitesse détermine en grande partie la concentration de suie et l'endroit où elle se dépose. Les grosses particules lourdes se déposent plus vite et tombent donc au sol plus près de la source et en concentration plus élevée. Il s'est révélé impossible de mesurer directement la vitesse de décantation; par conséquent les microphotographies de la suie ont été prises à partir de l'appareil du laboratoire pour permettre l'estimation des diamètres. Des photographies par microscope électronique et ordinaire ont été prises.

Les résultats paraissent à la figure 19. La suie était surtout composée d'un grand nombre de très petites particules dont le diamètre varie de un à 100 nm; la plupart avaient un diamètre d'environ 100 nm (0,1 μm). Ces particules se sont agglomérées en grosses particules qui atteignent souvent un "diamètre" d'un μm et à l'occasion de 10 μm , comme on peut le voir, par microphotographie. L'amas de grosses particules a environ 10 μm (0,01 mm) et est facilement visible au moyen d'un microscope ordinaire. Ces résultats sont conformes aux valeurs signalées par Ledbetter (1972) qui indiquent un écart de 30 nm à un μm pour la taille des particules contenues dans la fumée de pétrole.

L'examen de la suie au microscope ordinaire a révélé des particules dont le diamètre pouvait atteindre jusqu'à 40 μm . Il semble donc que la suie soit composée d'un spectre de particules dont la taille varie probablement d'un nm à 40 μm ; il peut même se former de plus grosses particules par amas. Étant donné cette observation, le choix d'une

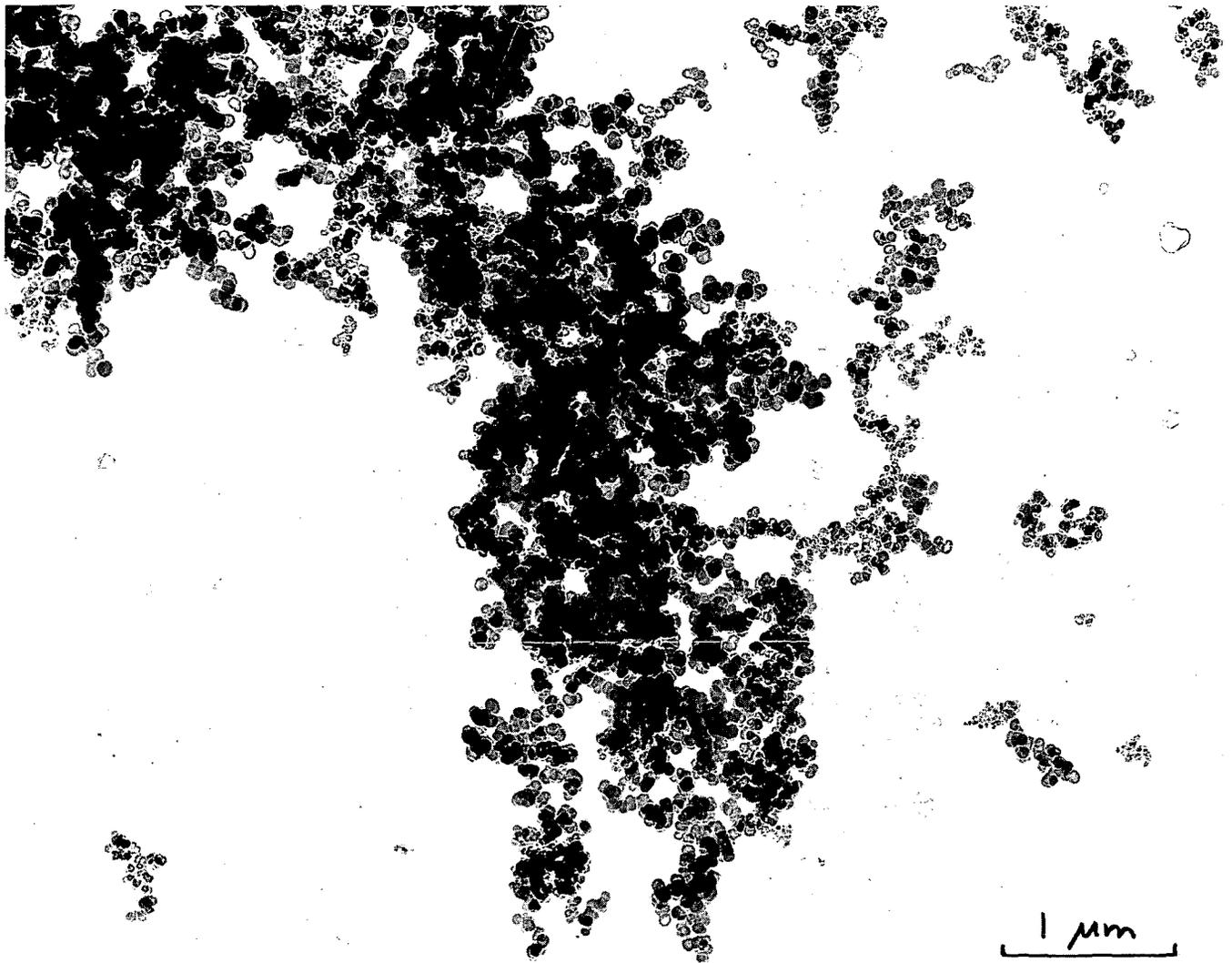


FIGURE 19 MICROPHOTOGRAPHIE DE LA SUIE
(Échelle 1,25 pouce = 1 µm)

vitesse de décantation devient presque inutile, mais il est nécessaire de procéder à un choix quelconque. L'approche la plus réaliste consiste probablement à poser comme principe que la suie se forme dans les flammes en particules dont la taille varie de un à 100 nm (elles sont si petites que leur vitesse de décantation est effectivement nulle), pour s'agglomérer graduellement dans l'élévation du panache de fumée et former des particules qui varient d'un μm à 10 μm . Le processus de groupement, de coagulation ou d'agglomération est décrit dans des textes sur la pollution atmosphérique comme celui de Williamson (1973).

D'après l'hypothèse que les particules ont la densité du carbone ($2,3 \text{ g/cm}^3$), la chute libre ou la vitesse de décantation des particules de suie peut être calculée à l'aide de l'équation de Stokes pour l'obtention des petits nombres de Reynolds et à l'aide d'un coefficient de résistance pour l'obtention des nombres élevés de Reynolds. Les vitesses approximatives sont établies comme suit (Ledbetter, 1972):

Taille des particules (μm)	Vitesse en chute libre (cm/s)	Durée nécessaire pour une chute de 100 mètres	
1000	600	17 s	
100	50	200 s	
30	5	2000 s	~ 0,6 h
10	0,6	$1,7 \times 10^4$	~ 4,7 h
3	0,06	$1,7 \times 10^5$	~ 47 h
1	0,007	$1,43 \times 10^6$	~ 400 h

Donc les particules ayant moins de 10 μm ont des vitesses de chute très lentes et prendront plusieurs heures ou plusieurs jours pour s'échapper du panache, lequel se situera alors probablement à des dizaines de kilomètres de sa source.

2.1.3 Résultats de la combustion en laboratoire. - Les résultats des expériences de combustion de pétrole figurent au tableau 3. Il a été établi que la fraction de pétrole brûlé et la quantité de suie formée dépendent de la température du récipient (qui influe sur celle du pétrole), du débit d'air et de la quantité de pétrole. Comme prévu, plus le pétrole

TABLEAU 3 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES DE LA COMBUSTION
DE PÉTROLE EN LABORATOIRE

i) Température variable du récipient; quantité constante de pétrole;
débit d'air constant

Quantité de pétrole (g)	Débit d'air (l/min)	Température du récipient (°C)	Efficacité de la combustion (%)	Suie considérée comme fraction du pétrole perdu (%)
12,5	190	198	81,6	-
13,0	190	148	60,0	1,2
12,0	190	147	63,3	4,3
12,5	190	98	44,8	-
12,1	190	39	33,9	2,9
12,5	190	31	34,4	2,8

ii) Débit d'air variable; quantité constante de pétrole;
température constante du récipient

Quantité de pétrole (g)	Débit d'air (l/min)	Température du récipient (°C)	Efficacité de la combustion (%)	Suie considérée comme fraction du pétrole perdu (%)
13,2	0	22	35,6	1,8
12,4	100	35	53,2	2,7
12,5	150	24	36,8	-
12,5	190	31	34,4	2,8

iii) Quantité variable de pétrole; température constante du récipient,
débit d'air constant

Quantité de pétrole (g)	Débit d'air (l/min)	Température du récipient (°C)	Efficacité de la combustion (%)	Suie considérée comme fraction du pétrole perdu (%)
16,6	190	13	57,8	2,1
12,5	190	31	34,4	2,8
12,1	190	39	33,9	2,9
8,3	190	21	24,1	4,5

est froid, moins la combustion est efficace; par exemple, à 198 °C, 81,6 p. 100 du pétrole ont été brûlés, tandis qu'à 31 °C, le pourcentage n'était que de 34,4 p. 100.

Ces conditions sont loin d'être celles d'une combustion à l'échelle réelle, mais les mêmes tendances s'appliquent probablement. Les résultats du débit d'air indiquent un taux optimal. Si le débit d'air est trop faible, le taux de combustion décroît et s'il est trop élevé, la flamme est soufflée. Plus la quantité de pétrole est grande, plus la combustion est efficace, probablement en raison de l'effet d'isolation de la nappe de pétrole plus épaisse.

La quantité de suie produite constituait généralement entre 2 p. 100 et 5 p. 100 de la masse originale de pétrole. Pour calculer la dispersion en grandeur réelle, on estime que 6 p. 100 représente un chiffre convenablement pessimiste.

2.1.4 Analyse des métaux.- Les analyses des métaux figurent au tableau 4. Il a été difficile d'obtenir un bilan de masse satisfaisant pour les métaux en raison des erreurs d'analyse et probablement en raison de la perte de métaux sous forme de vapeur. Les essais de laboratoire sur le vanadium ont démontré particulièrement que la suie contenait de 1 p. 100 à 3 p. 100 de métaux, mais qu'au moins 38 p. 100 de métaux ont été émis.

On croit que, selon la meilleure interprétation des données, un tiers des métaux a été émis. Des résultats semblables ont été obtenus avec du pétrole additionné d'octanoate au cobalt. Au cours des essais sur le terrain, la masse de suie n'a pu être déterminée; donc la masse des métaux émis n'a pu être calculée que comme la différence entre la masse originale des métaux et celle présente dans le résidu. Ces résultats indiquent un pourcentage d'émission beaucoup plus élevé de 79 à 80 p. 100, ce qui reflète une fraction beaucoup plus élevée du pétrole brûlé, c'est-à-dire 90 p. 100 comparativement au pourcentage obtenu en laboratoire, soit de 50 à 70 p. 100.

Apparemment, les métaux se concentrent dans le résidu au cours des premières phases de la combustion; environ 30 p. 100 des métaux sont émis au cours de la combustion des premiers 60 p. 100 du pétrole. Au fur et à mesure que davantage de résidus brûlent et crépitent dans les flammes, davantage de métaux sont émis et jusqu'à ce que la combustion atteigne 90 p. 100, environ 80 p. 100 des métaux sont émis.

TABLEAU 4 RÉSULTATS DES ANALYSES DES MÉTAUX

	1	2	3	4	5
Masse initiale du pétrole (g)	12,8	12,8	12,4	12,7	12,7
Concentrations des métaux ($\mu\text{g/g}$)	3,7	3,7	3,6	2,1	2,2
Masse des métaux (μg) (A)	47,4	47,4	44,6	26,7	27,9
Masse du résidu (g)	4,6	7,0	6,0	4,4	7,8
Concentrations des métaux ($\mu\text{g/g}$)	8,3	8,2	7,8	3,8	3,3
Masse des métaux (μg) (B)	38,2	57,4	46,8	16,7	25,7
Masse de la suie (g)	0,193	0,126	0,136	0,196	0,120
Concentrations des métaux ($\mu\text{g/g}$)	4,1	6,0	3,6	4,1	2,9
Masse des métaux (μg) (C)	0,8	0,8	0,5	0,8	0,3
Bilan de masse (%) $100 (B + C) / A$	82	123	106	66	93
Pourcentage apparent des métaux dans la suie (1)	2	2	1	3	1
Pourcentage apparent des métaux dans la suie (2)	19	-	-	37	8

(1) Calculé selon l'expression $100C/A$

(2) Calculé selon l'expression $100 (A - B) / A$

Les essais 1 à 6 ont été réalisés en laboratoire et la production de vanadium est naturelle.

Les essais 7 à 9 ont été réalisés sur le terrain et la production de vanadium est naturelle.

Les essais 10 à 12 ont été réalisés en laboratoire et de l'octanoate de cobalt a été ajouté.

TABLEAU 4

6	7	8	9	10	11	12
12,8	100	100	100	12,7	12,7	12,8
2,1	2,1	2,1	2,1	22,8	22,8	22,7
26,9	210	210	210	290	290	291
4,2	10,8	10,8	10,8	4,4	7,8	4,2
4,0	4,1	3,0	3,8	35,1	30,5	40,6
16,8	44,3	32,4	41,0	154	238	171
0,199	-	-	-	0,20	0,12	0,20
1,9	14,6	22,6	17,8	8,9	2,5	0
0,4	-	-	-	1,7	0,3	0
64	-	-	-	53	83	59
1	-	-	-	1	< 1	0
38	79	84	80	47	18	41

Aux fins de cette étude, il est supposé que, pour une combustion à 84 p. 100, 67 p. 100 des métaux sont émis et qu'ils se retrouvent finalement dans le panache. Du pétrole, dont la teneur en métaux est de neuf ppm, produira par conséquent un résidu contenant l'équivalent de trois ppm (pour une concentration de 19 ppm) et une émission équivalente à six ppm. Il s'agit d'un facteur de 10^4 de moins que la masse de suie, donc la concentration moyenne finale des métaux dans la suie sera d'environ 100 ppm.

2.1.5 Analyse du CO. - Un bilan de masse de soufre et de carbone laisse entrevoir que si 100 grammes de pétrole brûlé donnent six grammes de suie, les 94 grammes qui restent, approximativement, produiront environ 4 grammes de SO_2 , 9 grammes de CO et 280 grammes de CO_2 . Selon les estimations, les concentrations de CO sont de 2,25 fois supérieures aux concentrations de la masse de SO_2 . Suivant les préférences, les concentrations de la masse de CO_2 peuvent être calculées comme étant égales à 70 fois les concentrations de SO_2 .

2.2 Études sur le terrain de la combustion du pétrole

Les responsables de la protection de l'environnement du Grand Toronto et de la région ont accordé l'autorisation de réaliser une expérience de combustion de pétrole dans la réserve naturelle de Glen Major, près de Claremont, Ontario. Ce lieu est heureusement assez éloigné. Quarante gallons (impériaux) ($0,204 \text{ m}^3$, 146 kg) de mélange de pétrole brut corrosif d'Alberta fournis par BP Oil Ltd. ont été déversés sur une superficie de glace unie pour former une nappe d'un centimètre d'épaisseur et de cinq mètres de diamètre. Au moment de la combustion, la température de l'air était de -4°C et la vitesse du vent atteignait 8 km/h. La combustion eut lieu à 11 heures, le 3 février 1978. Le pétrole a été enflammé à l'aide d'un chiffon imbibé dans 7,5 litres de mélange de kérosène et d'essence. Les flammes se sont répandues rapidement sur toute la nappe, émettant un nuage dense de fumée noire. La combustion a duré six minutes.

On a tenté de mesurer les températures de la flamme et du panache de fumée à l'aide de thermocouples isolés à la céramique, montés sur une pyramide Dexion située dans le feu (figures 20 à 25). Les données de ces thermocouples devaient être relevées par un Thermoelectric MultiMite. En outre, un système de sondage thermométrique portatif a été utilisé; la sonde était montée à l'extrémité d'une tige manuelle d'aluminium de trois mètres de longueur.

Aucune mesure significative de température n'a été obtenue. La plupart des relevés des thermocouples ont immédiatement dépassé les limites. Les flammes ont entouré la pyramide et aucun relevé de la température n'a pu être pris au-dessus de la flamme. Il aurait fallu y installer un thermocouple à une hauteur de 10 mètres au moins; mais même dans ce cas, rien ne garantissait que le centre du panache se serait trouvé près

du thermocouple. La chaleur intense dégagée par le feu a empêché l'utilisation efficace du thermocouple manuel.

Il semble que, pour mesurer les températures dans le pétrole enflammé ou au-dessus, il faut prévoir soit i) de très petits feux d'environ 20 litres de pétrole, soit ii) la construction d'une tour très perfectionnée au-dessus du feu.

On a tenté de mesurer la quantité de suie formée dans la flamme en attirant par l'intermédiaire d'un tube (figure 21) une partie du panache des gaz de combustion dans une sonde à air Precision Scientific, munie d'un filtre à papier pré-pesé Whatman numéro 40. La vitesse d'élévation du panache de fumée et son diamètre ont été déterminés approximativement par cinématographie. Puisque le taux d'échantillonnage de l'air et le volume total du panache formé étaient connus, il était possible d'estimer une fraction de la quantité totale de la matière émise qui a été échantillonnée. Ce chiffre ajouté au poids de la matière recueillie pouvait donner une valeur approximative de la quantité de suie produite par la flamme.

Cette expérience s'est également soldée par un échec, puisque le tube d'échantillonnage n'a pu être placé convenablement au-dessus de la flamme, dans le panache, en raison de la chaleur intense. La génératrice qui alimentait la sonde à air a également fait défaut au cours de l'essai. Une certaine quantité de suie a été recueillie pour l'analyse, mais il n'a pas été possible d'effectuer des calculs quantitatifs de la suie. On n'a pas tenté d'analyser les hydrocarbures, le gaz carbonique ou l'oxyde de carbone.

Encore une fois, il a été conclu que les travaux doivent être réalisés soit à une échelle réduite, soit à l'aide d'un matériel très complexe. Il est préférable d'échantillonner le panache dans les airs.

Le pétrole initial et la suie ont tous deux été analysés afin d'établir la teneur en métaux lourds à l'aide de l'analyse d'activation neutronique aux instruments. La masse de pétrole résiduel a également été déterminée par la collection et la pesée directe et a été évaluée à 16 kg ou 10 p. 100 de la masse initiale du pétrole.

Le panache s'est élevé à un angle d'environ 30 degrés par rapport à la verticale, mais variait selon la vitesse et la direction du vent. La vitesse d'élévation du panache a

été estimée par cinématographie à 5 m/s environ et augmentait régulièrement de diamètre pour atteindre le double à une hauteur d'environ 20 m. L'élévation totale du panache de fumée n'a pu être mesurée avec précision, mais on croit qu'elle était de 150 m environ.

La vigueur de la combustion du pétrole était impressionnante et laissait entrevoir qu'une fois un feu allumé, il peut se propager rapidement aux nappes voisines. La glace sous le pétrole a fondu et l'eau a bouilli, bouillonnant au travers de la couche de pétrole enflammée et transportant probablement une certaine quantité de matières non volatiles dans la flamme et le panache. La flamme a tendance à s'étendre par le transport du pétrole enflammé sur l'eau qui s'écoule; ce phénomène peut se révéler très utile dans les opérations de nettoyage. Le personnel de la région court évidemment un certain danger, surtout s'il est entouré par du pétrole inflammable. Pour cette raison, il est souhaitable d'utiliser des hélicoptères pour l'allumage à distance.

Le résidu du pétrole était un épais goudron, qui a été recueilli facilement. La quantité relativement petite du résidu, 10 p. 100, peut refléter la nature inaltérée du pétrole. Si le même résidu avait été laissé après l'évaporation d'environ 30 p. 100 du pétrole (comme cela s'est produit quelques jours plus tard), le résidu aurait représenté 14 p. 100 du pétrole altéré.

L'expérience de combustion a servi à fournir certaines informations sur la nature du processus de combustion et sur les caractéristiques d'élévation du panache de fumée. Les figures 20 à 25 illustrent l'expérience.

Si d'autres expériences de combustion à grande échelle doivent être entreprises pour obtenir des données sur la température et la quantité de suie, il est évident qu'un système d'échantillonnage et d'instruments plus perfectionnés est nécessaire, ce qui entraîne également des dépenses plus élevées. La solution la plus économique consiste probablement à entreprendre un certain nombre de petites expériences de combustion qui peuvent être facilement mesurées à l'aide d'instruments pour l'obtention de données. Celles-ci peuvent être analysées et utilisées pour concevoir une expérience ultérieure de grande envergure. De même, on ne sait pas encore très bien quels paramètres doivent être mesurés ni de quelle façon ils doivent l'être. Comme la combustion est l'une des méthodes de nettoyage les plus avantageuses, il est parfaitement justifié de procéder à d'autres travaux d'expérimentation.



FIGURE 20 AMÉNAGEMENT DU SITE DE COMBUSTION



FIGURE 21 DÉBUT DE LA COMBUSTION



FIGURE 22 COMBUSTION DEUX MINUTES APRÈS L'ALLUMAGE



FIGURE 23 COMBUSTION QUATRE MINUTES APRÈS L'ALLUMAGE



FIGURE 24 COMBUSTION CINQ MINUTES APRÈS L'ALLUMAGE



FIGURE 25 FIN DE LA COMBUSTION EXPÉRIMENTALE

3 CALCULS DE DISPERSION

3.1 Combustions unitaires

3.1.1 Hypothèses.- On suppose que chaque nappe comprend $1,0 \text{ m}^3$ de pétrole contenant 2 p. 100 de soufre (ce qui forme le SO_2). Le pétrole se consume en 10 minutes pour former de la suie qui représente 6 p. 100 de la masse initiale du pétrole à la vitesse de 83 g/s et du SO_2 se produit à raison de 55 g/s. On suppose que la concentration des métaux est de 10 ppm dont six ppm sont émises sous forme de matières particulaires. Le taux d'émission est de $8,3 \times 10^{-3}$ g/s, ou 1/10 000 de celui d'émission de la suie.

Même si des hydrocarbures sont émis, l'étude du bilan global de masse du pétrole (section 1.2) indique que la quantité d'hydrocarbures émise dans les combustions sera négligeable, comparée à la quantité émise par l'évaporation directe. Si, par exemple, on suppose qu'un pour cent de pétrole brûlé est émis sous forme d'hydrocarbures, cette quantité correspond à environ un pour cent des émissions totales d'hydrocarbures par évaporation. Il est évident que les émissions ambiantes d'hydrocarbures proviennent de l'évaporation plutôt que de la combustion. Celle-ci contribue à réduire les émissions d'hydrocarbures. Par conséquent, aucun calcul de la dispersion des hydrocarbures n'a été effectué. Heureusement, les hydrocarbures ne sont pas considérés comme des polluants particulièrement nocifs dans les régions qui ne sont pas soumises au smog photochimique.

Les conditions météorologiques étudiées font état de vitesse des vents de deux, quatre, six et huit m/s, ce qui représente la gamme prévue. La vitesse nulle du vent est étudiée séparément plus loin. On suppose que la hauteur de la couche de brassage est de 310 m de haut.

3.1.2 Calcul de l'élévation du panache de fumée.- Un certain nombre d'équations permettent de calculer l'élévation du panache de fumée en fonction de la vitesse du vent, du taux d'émission de chaleur, de la zone de combustion, de la vitesse de sortie. Les équations utilisées sont extraites des méthodes de Holland, Concawe Lucas et al., et Singer et al. Comme il fallait s'y attendre, les résultats ont présenté des écarts considérables, voir figure 14. Les détails des calculs paraissent à l'annexe A. Une élévation moyenne du panache de fumée a été calculée, comme le montre la figure 14. Il faut admettre que les données comportent probablement une marge d'erreur de ± 50 p. 100.

Ces équations ne peuvent servir à prévoir une élévation du panache de fumée à une vitesse nulle, mais les résultats des expériences laissent entrevoir qu'une élévation de 500 m est vraisemblable.

3.1.3 Dispersion du SO₂.- L'équation utilisée dans le calcul de dispersion est décrite à l'annexe B et provient de la méthode de Turner (1970). Elle donne la concentration au niveau du sol, au centre (c'est-à-dire, exactement sous le vent: le pire cas) en fonction de la concentration de la source, la vitesse du vent, la classe de stabilité (B à F), la hauteur de l'élévation du panache de fumée et la hauteur de mélange. Les coefficients de dispersion horizontale et verticale proviennent de la classe de stabilité - diagrammes de distance sous le vent donnés par Turner (1970). L'équation suppose qu'il se produit une réflexion au sol et à la face supérieure de la couche de mélange.

Un certain nombre de calculs ont été effectués pour faire varier les combinaisons de variables et la concentration au niveau du sol au centre a été calculée en fonction de la distance du feu. Les profils typiques des figures 26 et 27 montrent l'effet de la stabilité et de la vitesse du vent. L'ordonnée est la concentration de SO₂ (g/m³) et l'abscisse est la distance sous le vent (km).

Le comportement général est celui qui avait été prévu; la concentration est presque nulle dans le voisinage immédiat du feu en raison de l'élévation du panache de fumée. La diffusion verticale et vers le bas commence à précipiter le SO₂ au niveau du sol à un kilomètre environ sous le vent, dans le cas de la diffusion rapide, classe B, entraînant des concentrations maximales au niveau du sol de plus de 100 µg/m³. Dans des conditions plus stables (classes D et E), le maximum est atteint plus loin sous le vent, de 5 à 20 km, et les concentrations sont nettement inférieures, soit de 30 à 70 µg/m³. Les pires conditions se manifestent près du feu (classe B), en présence de faible vitesse du vent. Les résultats figurent au tableau 5.

L'augmentation de la vitesse du vent diminue la hauteur du panache de fumée et a habituellement tendance à provoquer une plus grande exposition près du feu. Les concentrations à 10 et 40 km sous le vent sont réduites par la dilution. Au-dessus de 2 m/s, le panache pénètre dans la partie supérieure de la couche de mélange; il est probablement dilué à des hauteurs de 300 à 500 m, provoquant ainsi une faible exposition au niveau du sol.

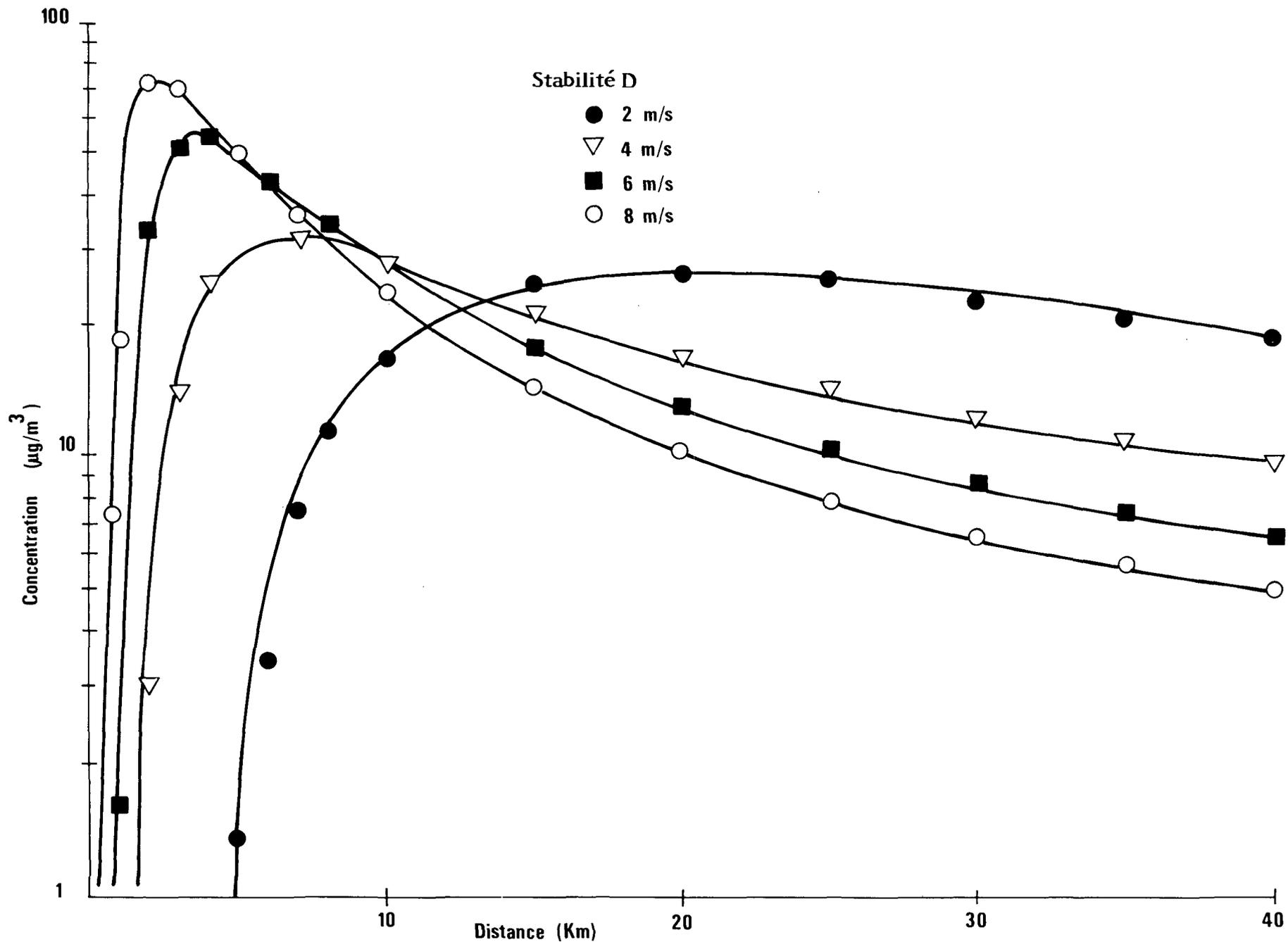


FIGURE 26 CONCENTRATION D'ANHYDRIDE SULFUREUX EN FONCTION DE LA DISTANCE

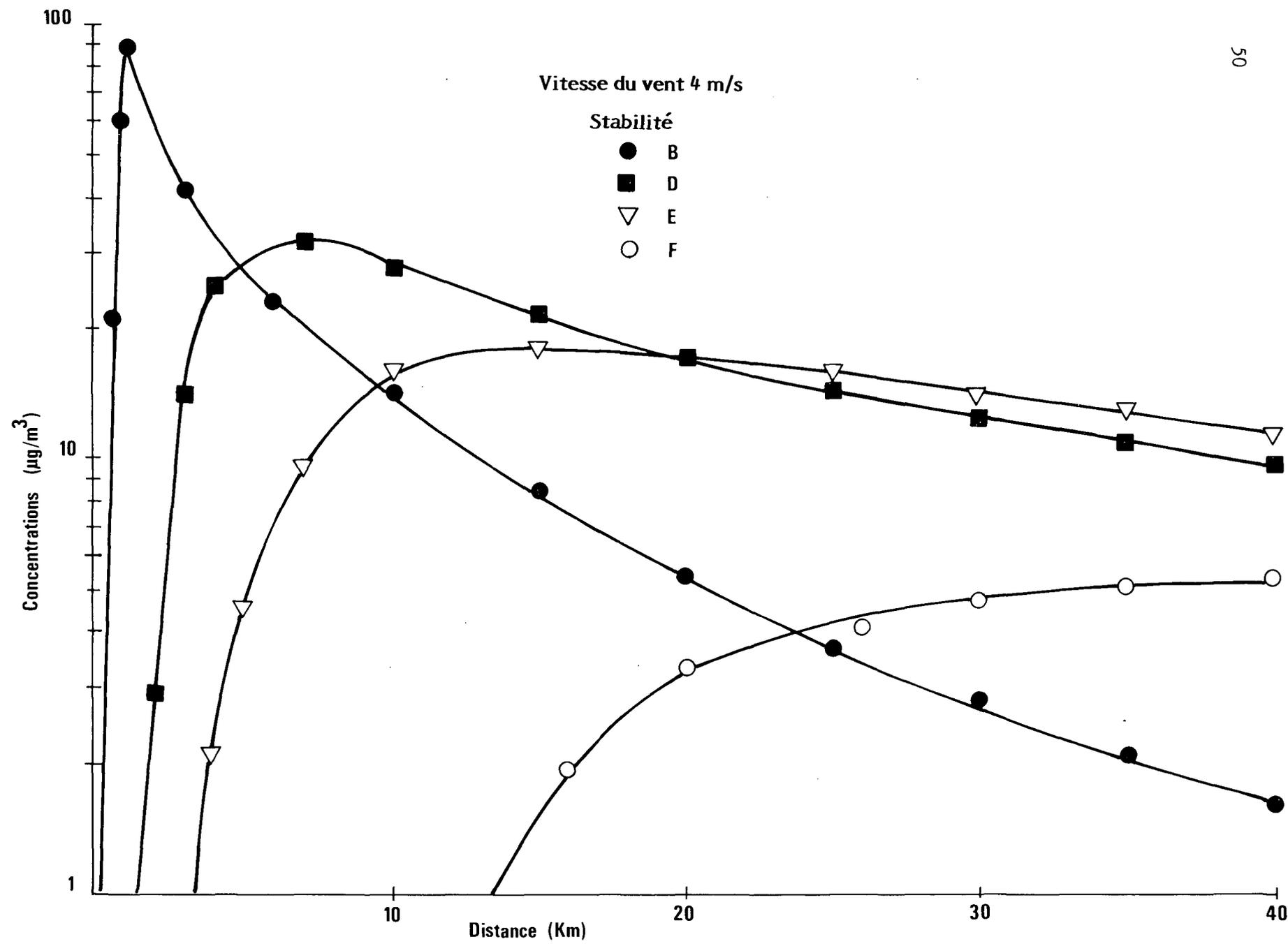


FIGURE 27 CONCENTRATION D'ANHYDRIDE SULFUREUX EN FONCTION DE LA DISTANCE

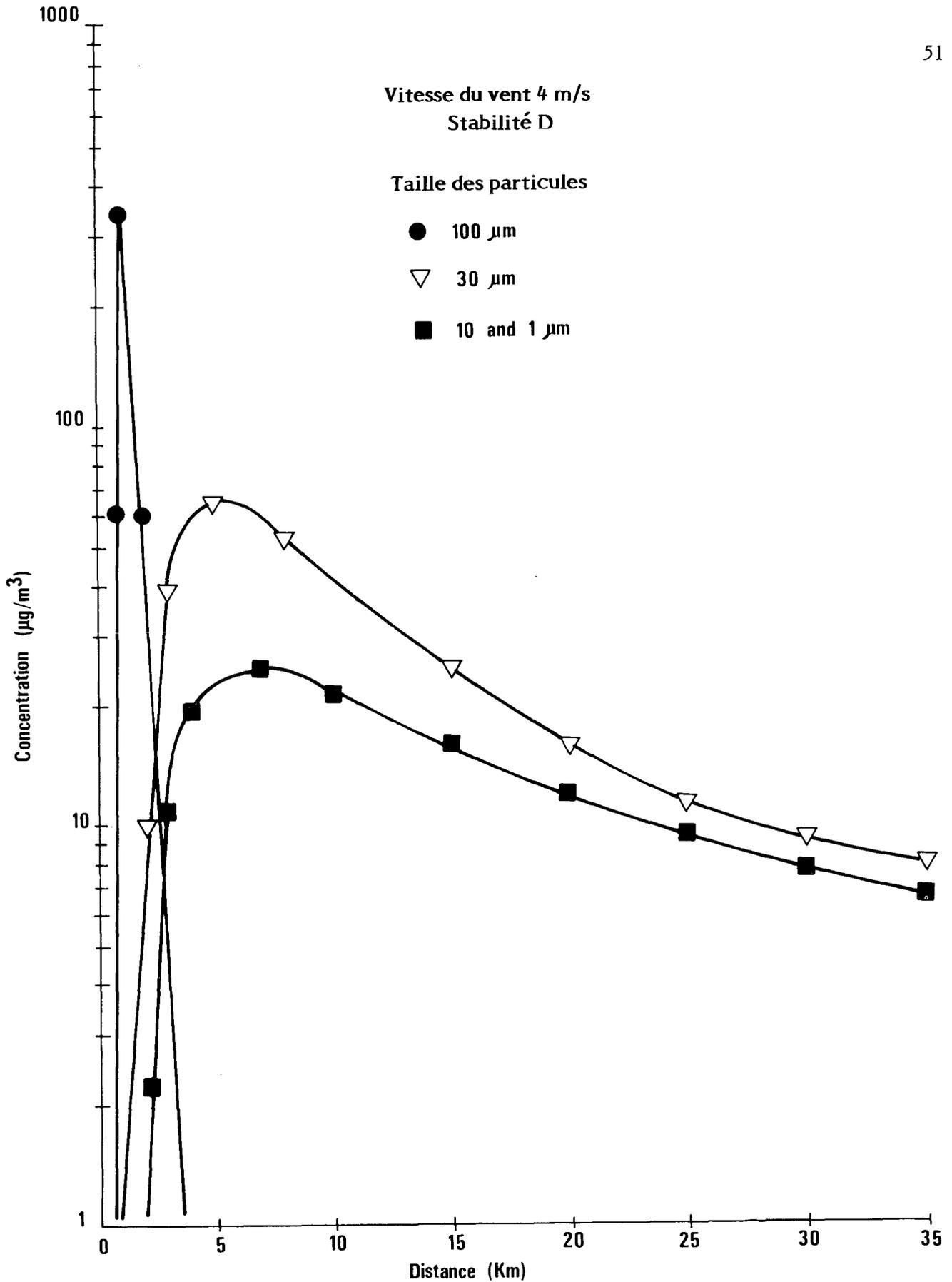


FIGURE 28 CONCENTRATION DE LA SUIE EN FONCTION DE LA DISTANCE

On croit qu'une combustion unitaire provoquera des expositions à la concentration maximale, telles que résumées ci-dessous. Si on suppose que trois nappes se consomment simultanément, il faut multiplier par trois pour estimer les concentrations maximales de groupes.

	À partir d'une nappe	À partir d'un groupe de nappes
Concentration maximale de SO ₂ près du feu µg/m ³	100	300
Concentrations à 10 km	30	90
Concentrations à 40 km	10	30

TABLEAU 5 CONCENTRATIONS DE SO₂ (µg/m³) À DES DISTANCES DÉTERMINÉES SOUS LE VENT (km)

Vitesse du vent		Élévation du panache de fumée m	Classe de stabilité									
m/s	km/h		B	D		E		F				
2	7,2	310	102	à	2	26	à	20	8	à	35	aucun maximum < 1 à 10 0,04 à 40
			28	à	10	17	à	10	0,3	à	10	
			3,2	à	40	19	à	40	8	à	40	
4	14,4	165	89	à	1	32	à	7	18	à	15	aucun maximum 1 à 10 5 à 40
			14	à	10	28	à	10	16	à	10	
			2	à	40	10	à	40	12	à	40	
6	21,6	114	-			54	à	4	33	à	7	-
						28	à	10	32	à	10	
						7	à	40	11	à	40	
8	57,6	88	-			72	à	2	52	à	5	-
						24	à	10	32	à	10	
						5	à	40	9	à	40	

N.B. La première entrée est la concentration maximale.

La signification de ces niveaux de concentration sera exposée plus en détail. Les teneurs en soufre autres que les deux pour cent supposés ici, modifieront de façon linéaire les concentrations d'émission; par exemple, dans l'hypothèse d'une teneur de soufre d'un pour cent, les concentrations devraient être réduites de moitié.

Il convient de noter qu'à des distances supérieures à 10 km sous le vent, l'équation est réduite à la formule approximative suivante:

$$\begin{aligned} & (\text{Hauteur de mélange en m}) \times (\text{largeur du panache en m}) \\ & \times (\text{vitesse du vent en m/s}) \times (\text{concentration en g/m}^3) = \\ & (\text{taux d'émission en g/s}) \end{aligned}$$

Comme la largeur du panache est habituellement d'environ 10 p. 100 de la distance sous le vent $D(m)$, l'équation devient une hauteur de mélange de 300 m et U (m/s), la vitesse du vent.

$$\text{Concentration} = \text{taux d'émission}/(30 \text{ UD})$$

Pour l'ensemble des expériences de combustion, le taux d'émission total s'élevait en moyenne à 90 g/s pour une heure. Ainsi à trois m/s, la concentration sous le vent atteindra environ $(1/D \text{ g/m}^3)$; c'est-à-dire, $100 \mu\text{g/m}^3$ à 10 km, $50 \mu\text{g/m}^3$ à 20 km, et $20 \mu\text{g/m}^3$ à 40 km.

3.1.4 Matières particulaires (suie).- L'équation permettant de calculer les concentrations de suie sous le vent figure à l'annexe C. Elle est semblable en principe à l'équation utilisée pour le calcul du SO_2 en ce sens qu'elle a une fonction similaire pour le taux d'émission, la vitesse du vent et la classe de stabilité et qu'elle suppose une réflexion dans la partie supérieure du mélange.

L'équation utilisée pour calculer les concentrations de suie comprend deux différences importantes par rapport à celle qui sert à calculer les concentrations de SO_2 . En premier lieu, elle ne suppose aucune réflexion au sol, c'est-à-dire que toutes les particules qui touchent le sol sont déposées; par conséquent, les concentrations ont tendance à être inférieures à celles du SO_2 . En deuxième lieu, une vitesse de décantation est attribuée aux particules et elle a tendance à provoquer des concentrations plus élevées près du feu et des concentrations plus faibles à de plus grandes distances du feu. La

méthode utilisée est celle du "panache de fumée incliné" dans laquelle une inclinaison vers le bas est attribuée (de façon fictive) au panache et qui représente une réduction de hauteur de $w x / u$, où w est la vitesse de décantation (m/s), x la distance sous le vent (m), et u est la vitesse du vent (m/s). La quantité x/u est essentiellement la période de chute qui, une fois multipliée par la vitesse, donne la distance de chute. La vitesse de décantation est ainsi comprise comme une variable d'entrée.

Les résultats sont donnés aux figures 28, 29 et 30 qui montrent les effets de la taille des particules, de la vitesse du vent et de la stabilité, et dans les tableaux 6, 7, 8 et 9. Deux autres quantités peuvent être calculées. La première est le taux de dépôt au centre G_C ($\text{g/m}^2 \times \text{s}$), qui est la concentration au niveau du sol (g/m^3), multipliée par la vitesse de décantation (m/s). La deuxième est le taux de dépôt moyen au niveau du sol G_M ($\text{g/m}^2 \times \text{s}$), sur une bande d'un mètre de largeur dans une direction sous le vent et de 2,67 écarts types (σ_z) de longueur dans une direction latérale (perpendiculaire à la direction du vent); il s'agit de la zone où tombent environ 95 p. 100 de toutes les matières particulaires. Il peut être démontré que G_M est 0,63 G_C . Ces quantités ont une relation linéaire avec la concentration. Il est également intéressant de noter la distance sous le vent à laquelle la majorité des matières particulaires touche le sol.

La figure 28 montre que les particules supérieures à 50 μm , c'est-à-dire pour des vitesses de décantation supérieures à 10 cm/s, il se produit un dépôt appréciable dans les premiers kilomètres distants du feu. Entre 50 et 15 μm , les particules sont transportées plus loin du feu; et à moins de 15 μm (vitesse 1 cm/s), les particules tombent si lentement qu'elles se comportent comme des gaz dans les mêmes conditions.

À la lumière des tableaux 6 à 9, il semble que les expositions seront comme suit:

	À partir d'une nappe	À partir d'un groupe de nappes
Concentrations maximales de suie près du feu μg	700	2100
Concentrations à 10 km	200	600
Concentrations à 40 km	15	45

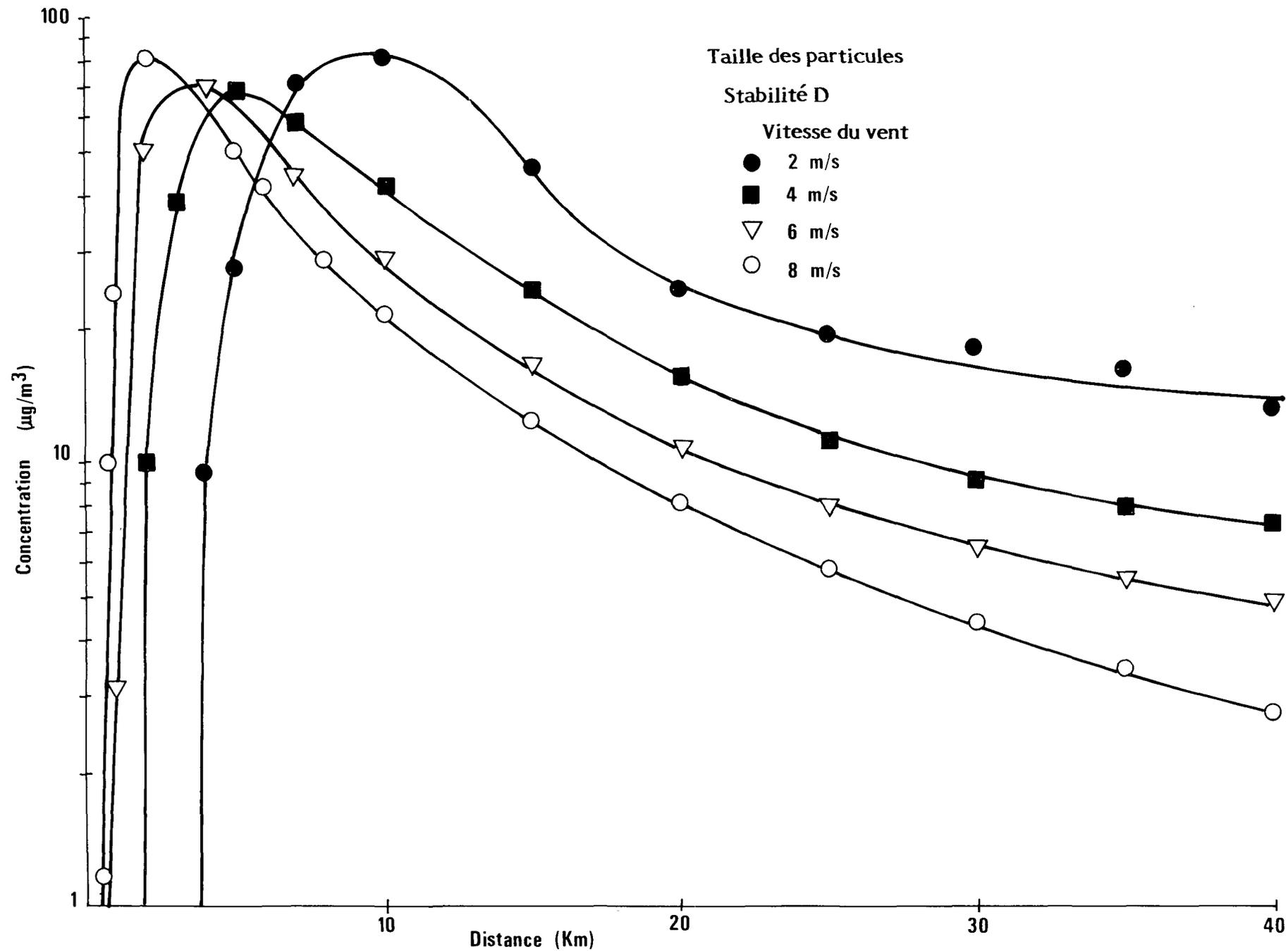


FIGURE 29 CONCENTRATION DE LA SUIE EN FONCTION DE LA DISTANCE

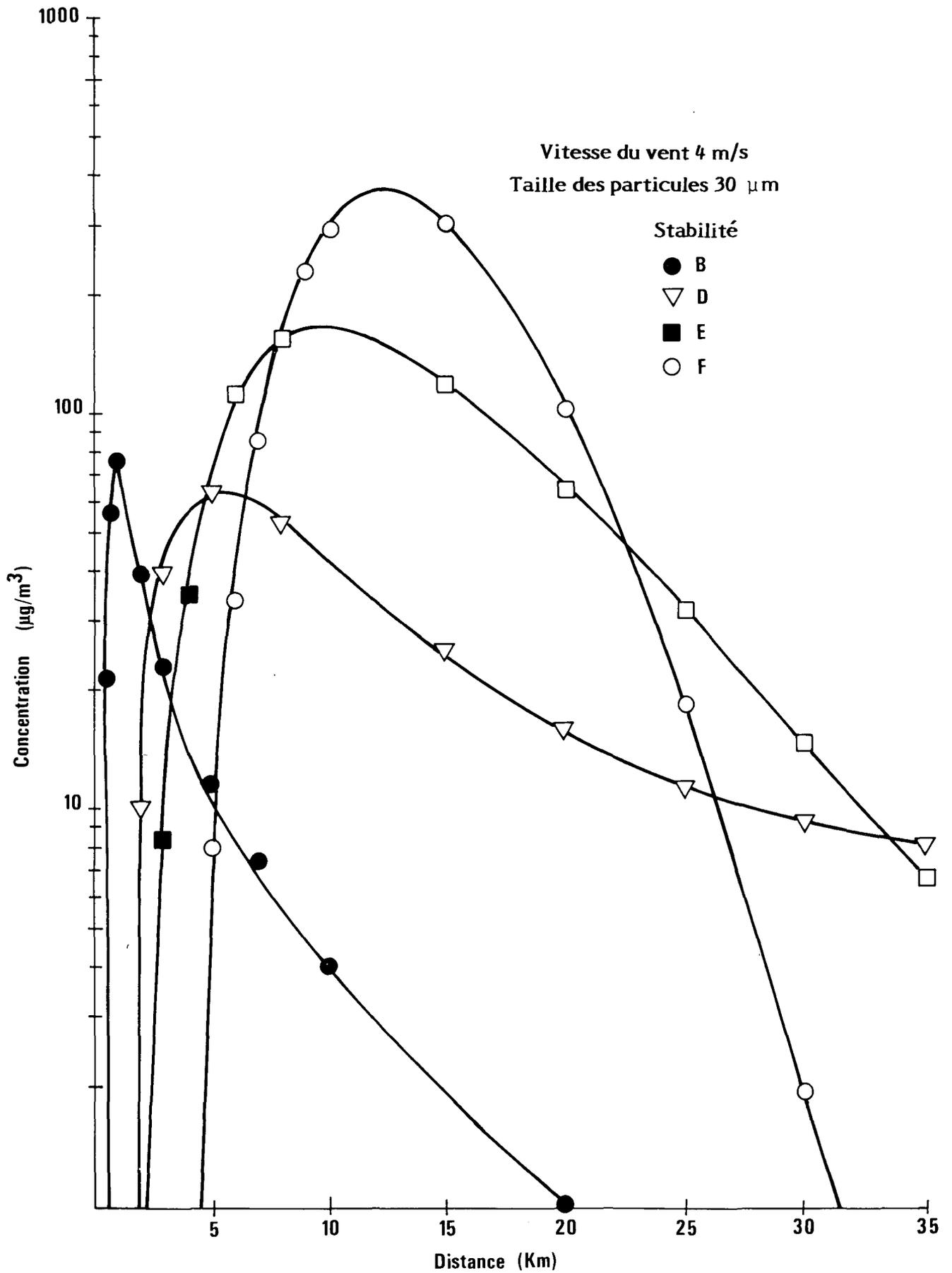


FIGURE 30 CONCENTRATION DE LA SUIE EN FONCTION DE LA DISTANCE

TABLEAU 6 CONCENTRATIONS DE LA SUIE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) À DES DISTANCES
SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES (taille des particules: 100 μm)

Vitesse du vent		Élévation du panache de fumée	Classe de stabilité							
m/s	km/h	m	B		D		E		F	
2	7,2	310	304	à 1	482	à 1	106	à 1	143	à 1
			1	à 10	0	à 10	0	à 10	0	à 10
			< 1	à 40	0	à 40	0	à 40	0	à 40
4	14,4	165	223	à 0,8	682	à 1	513	à 1	171	à 1
			2	à 10	0	à 10	0	à 10	0	à 10
			0,1	à 40	0	à 40	0	à 40	0	à 40
6	21,6	114	-		640	à 1	722	à 1	-	
			-		0	à 10	0	à 10	-	
			-		0	à 40	0	à 40	-	
8	57,6	88	-		559	à 1	752	à 1	-	
			-		< 1	à 10	0	à 10	-	
			-		0	à 40	0	à 40	-	

N.B. La première entrée est la concentration maximale.

TABLEAU 7 CONCENTRATIONS DE LA SUIE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) À DES DISTANCES
SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES (taille des particules: 30 μm)

Vitesse du vent		Élévation du panache de fumée m	Classe de stabilité											
m/s	km/h		B	D	E	F								
2	7,2	310	38	à	3	82	à	9	152	à	10	297	à	15
			8	à	10	80	à	10	30	à	40	290	à	10
			0,6	à	40	13	à	40				< 1	à	40
4	14,4	165	77	à	1	63	à	5	164	à	10	223	à	10
			4	à	10	42	à	10	3	à	40	62	à	40
			0,3	à	40	7	à	40						
6	21,6	114	-			70	à	3	80	à	6	-		
			-			29	à	10	62	à	10	-		
			-			5	à	40	4	à	40	-		
8	57,6	88	-						83	à	4	-		
									43	à	10	-		
									4	à	40	-		

N.B. La première entrée est la concentration maximale.

TABLEAU 8 CONCENTRATIONS DE LA SUIE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) À DES DISTANCES
SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES (taille des particules: 10 μm)

Vitesse du vent		Élévation du panache de fumée m	Classe de stabilité											
m/s	km/h		B	D	E	F								
2	7,2	310	39	à	2	10	à	20	Aucun maximum					
			7	à	10	7	à	10	0,1	à	10	0	à	10
			0,6	à	40	8	à	40	4	à	40	0,03	à	40
4	14,4	165	67	à	1	25	à	7	14	à	15	Aucun maximum		
			4	à	10	21	à	10	12	à	10	0,5	à	10
			0,3	à	40	6	à	40	9	à	40	5	à	40
6	21,6	114	-		41	à	4	25	à	7	-			
			-		21	à	10	25	à	10	-			
			-		4	à	40	8	à	40	-			
8	57,6	88	-		54	à	2	60	à	5	-			
			-		18	à	10	48	à	10	-			
			-		3	à	40	13	à	40	-			

N.B. La première entrée est la concentration maximale.

TABLEAU 9 CONCENTRATIONS DE LA SUIE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) À DES DISTANCES
SOUS LE VENT (km) DÉTERMINÉES (taille des particules: 1 μm)

Vitesse du vent		Élévation du panache de fumée m	Classe de stabilité							
m/s	km/h		B		D		E		F	
2	7,2	310	39	à 2	19	à 20	0,1	à 10	0	à 10
			7	à 10	11	à 10	3	à 40	0,02	à 40
			0,6	à 40	14	à 40				
4	14,4	165	7	à 1	24	à 7	14	à 15		
			4	à 10	21	à 10	12	à 10	0,4	à 10
			0,3	à 40	6	à 40	9	à 40	4	à 40
6	21,6	114	-		40	à 4	25	à 7	-	
			-		21	à 10	24	à 10	-	
			-		4	à 40	8	à 40	-	
8	57,6	88	-		54	à 2	60	à 5	-	
			-		18	à 10	48	à 10	-	
			-		3	à 40	13	à 40	-	

N.B. La première entrée est la concentration maximale.

3.1.5 Concentrations de métaux.- Les concentrations de métaux et le taux de dépôt peuvent être estimés en divisant simplement les quantités de matières particulaires par un facteur de 10^4 .

3.1.6 Oxyde de carbone.- Les concentrations d'oxyde de carbone peuvent être estimés en multipliant les concentrations de SO_2 par un facteur de 2,25.

3.1.7 Dispersion par vent nul.- Toutes les équations de dispersion couramment utilisées renferment la supposition implicite que la diffusion turbulente qui disperse les émissions est créée par le vent. Les équations ne sont plus valables par vent nul. Il est possible d'établir une équation appropriée de diffusion des nuages dans des conditions stagnantes pour exprimer la concentration en fonction du temps, de la force et de la diffusibilité de la source de position, mais il n'existe aucune information sur la valeur du coefficient de diffusion. La diffusibilité moléculaire est évidemment trop faible. Comme il s'agit probablement de la condition qui donnera naissance vraisemblablement aux concentrations les plus élevées, il est recommandé que certains travaux théoriques et expérimentaux soient entrepris pour élucider le comportement et quantifier les concentrations.

Heureusement, ces conditions sont assez rares. Burns (1973) présente les données pour Cape Parry, pour les mois de juin à août, selon lesquelles la probabilité d'une vitesse du vent inférieure à 4 mph (1,8 m/s) n'est que de 2 p. 100. Même si ces conditions se présentent, il est improbable qu'elles persistent plus d'une journée.

3.2 Superposition de panaches de fumée provenant d'un groupe de nappes de pétrole enflammées

Le dernier problème abordé ici est l'importance que peuvent prendre des panaches de fumée provenant de différents groupes de nappes de pétrole enflammées en se superposant et en exposant ainsi une région à de multiples concentrations, calculées pour un groupe de nappes de pétrole.

Si un groupe de nappes brûlent, pendant une heure, sous un vent d'une vitesse U m/s, il se produira un panache de $3600 U$ m ou de $3,6 U$ km de longueur. D'une manière générale, à 4 m/s ou 14,4 km/h, le panache aura 14,4 km de longueur. Il augmentera en largeur en raison de la diffusion horizontale et aura habituellement une largeur d'environ

20 p. 100 de la distance sous le vent du feu; par exemple, à 10 km, il pourra avoir 2 km de largeur. Les pires conditions se produiront vraisemblablement à moins de 10 km du feu; les panaches à cette distance auront habituellement 15 km de longueur et 2 km de largeur, couvrant une superficie de 30 km^2 .

Chaque panache balayera une zone d'environ 2 km de largeur. La distance de balayage peut atteindre jusqu'à 50 km; le panache sera ainsi transporté jusqu'à l'extrémité de la zone touchée par le déversement ou sera dilué en une concentration négligeable. La superficie balayée sera de 100 km^2 en une période de trois heures environ ou de 33 km^2 en une heure. À la lumière du tableau 1, l'hypothèse est émise qu'un nombre maximal de 10 groupes de nappes de pétrole se consomment à n'importe quel moment dans une zone totale de déversement de 2400 km^2 . Il y aurait un groupe de nappes en flammes tous les 240 km^2 et cette condition maximale ne subsistera que pendant 18 heures.

Comme les panaches se déplaceront tous dans la même direction (ils sont soumis au même champ de vent) il est peu probable qu'un panache en rejoigne un autre. La superposition ne se produira que si un panache est poussé au-dessus d'un groupe de nappes enflammées. La modification de la vitesse du vent ne change pas beaucoup la probabilité, puisque la zone balayée augmente et que le temps de séjour diminue. Toutefois la longueur du panache est augmentée, mais elle est accompagnée d'une réduction de la concentration.

Une analyse statistique simple conclut qu'environ un tiers de tous les feux seront balayés par le panache d'un autre feu. La raison est la suivante: si trois feux sur dix sont balayés par un panache, sept panaches simples et trois panaches doubles se formeront au cours de chaque heure; les 13 panaches couvriront une superficie totale de 300 km^2 . Comme il y a 30 panaches dans la région, leur superficie totale sera de 700 km^2 ou 30 p. 100 de l'étendue totale du déversement, soit 2400 km^2 . Il existe donc une probabilité de 30 p. 100 quant à la présence d'un feu dans la zone d'un panache. Chaque panache qui balaie une zone de $30 \text{ km}^2/\text{h}$ aura ainsi une probabilité de $(10 \times 30/2400)$ ou de 12 p. 100 de rencontrer l'un des dix feux sur la superficie totale de 2400 km^2 chaque heure, ce qui est donc une probabilité de 30 p. 100 en trois heures. La superposition d'un panache double sur un feu se produira dans une proportion d'un feu sur dix.

Cette analyse est forcément approximative, en ce sens que la probabilité de superposition est étroitement fonction de l'alignement des groupes de nappes de pétrole par rapport à la direction du vent. La superposition de deux concentrations près des feux de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 , par exemple, sera rare. La pire condition à survenir sera la superposition d'une concentration de 10 km avec une concentration près du feu, qui se produira pour cinq à 10 p. 100 des panaches; et plus souvent, c'est-à-dire pour 20 à 25 p. 100 des panaches, il faut s'attendre à ce que les concentrations de 10 km ou 30 km doublent. Ces concentrations superposées figurent au tableau 4. Ces conditions, avec une superposition d'environ un tiers, se produiront seulement au cours de la période de combustion la plus intense.

4 ANALYSE

Dans l'analyse de la gravité de l'impact de ces conditions atmosphériques, il est instructif, en premier lieu, d'examiner les objectifs nationaux afférents à la qualité de l'air et les niveaux types des centres urbains du Canada. Le tableau 10 donne les objectifs pour le SO₂, les matières particulaires et le CO ainsi que les niveaux annuels moyens de 1975 pour plusieurs villes canadiennes. Ces quantités peuvent être comparées aux niveaux prévus du tableau 11, pour un groupe de nappes enflammées, établis dans la section précédente et permettant une certaine superposition.

Pour le SO₂, il est évident que les niveaux ne sont pas anormalement élevés. Les concentrations près du feu sont inférieures aux concentrations acceptables et souhaitables d'une heure, tandis que celles qui se trouvent à une certaine distance du feu (10 km) se situent dans les niveaux moyens souhaitables de 24 heures. Les concentrations qui se produiront vraisemblablement dans la région générale (40 km) sont en réalité inférieures aux niveaux qui prévalent dans les centres urbains canadiens. En conclusion, les niveaux de SO₂ qui peuvent être vraisemblablement atteints par du pétrole ayant une teneur de soufre de 2 p. 100 sont bien inférieurs aux niveaux qui suscitent de graves préoccupations.

Pour les matières particulaires, les concentrations sont quelque peu supérieures à celles du SO₂, en raison du taux d'émission plus élevé et de leur tendance à tomber plus près du feu. Il n'y a pas de normes moyennes d'une heure auxquelles les concentrations prévues peuvent être comparées. Il semble que les concentrations produites dans les zones éloignées du feu (au-delà de 40 km) seront celles des normes en vigueur et des centres urbains. Il convient de noter que les "matières particulaires" peuvent renfermer diverses espèces chimiques ayant des toxicités très différentes, ainsi, la comparaison établie sur ces prémisses peut induire en erreur. Cette question est abordée plus loin.

Pour le CO dont les concentrations sont fixées ici de façon arbitraire à 2,25 fois celles du SO₂, les niveaux sont inférieurs aux normes d'un facteur de 10 et il n'y a vraisemblablement pas de problème.

Il n'existe pas de norme pour les métaux qui peuvent atteindre 10⁻⁴ fois les niveaux des matières particulaires. Par conséquent, il n'est pas possible de faire un compte rendu définitif, même si certains commentaires énoncés plus loin sur les éléments des matières particulaires s'appliqueront.

TABLEAU 10 NIVEAUX ATMOSPHÉRIQUES DE SO₂, DE MATIÈRES PARTICULAIRES
ET DE CO AU CANADA (µg/m³)

		SO ₂	Matières particulaires	CO
Concentrations maximales acceptables*	1 h	900	-	35 000
	8 ou 24 h	300(24)	120(24)	15 000(8)
	1 an	60	70	-
Concentrations maximales souhaitables*	1 h	450	-	15 000
	8 ou 24 h	150(24)	-	6 000(8)
	1 an	30	60	-
Concentration annuelle réelle 1975**	Ottawa (Slater/Elgin)	52	77	3,6 x 10 ³
	Sudbury (Ash)	73	32	-
	Edmonton (109/98)	-	73	1,5 x 10 ³
	Toronto (College)	39	71	-
	Montreal (Drummond)	96	101	-
	Moyenne	65	71	2,5 x 10 ³

* Source: Critères pour les objectifs nationaux afférents à la qualité de l'air ambiant, Pêches et Environnement Canada, 1976.

** Source: Rapport de surveillance nationale de la pollution atmosphérique - Extrait annuel 1975, EPS-5-AP-76-16.

TABLEAU 11 CONCENTRATIONS PRÉVUES AU COURS DE LA COMBUSTION
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	SO_2			Matières particulaires			CO		
	Nappe	Groupe*	SP**	Nappe	Groupe*	SP**	Nappe	Groupe*	SP**
Concentration près du feu	100	300	390	700	2100	2700	225	675	875
Concentration à 10 km	30	90	180	200	600	1200	67	200	400
Concentration à 40 km	10	30	60	15	45	90	22	67	120

* Groupe de nappes

** Superposition. Les concentrations superposées sont obtenues en ajoutant le chiffre de 10 km à la concentration près du feu, en doublant la concentration à 10 km et en doublant la concentration à 40 km.

Pour les hydrocarbures, la principale source est l'évaporation du pétrole imbrûlé et non le pétrole brûlé. Il n'existe pas de norme pour les hydrocarbures et ses composés ne sont pas normalement considérés comme nocifs aux faibles concentrations prévues. Seules les régions soumises au smog photochimique à des concentrations où existe un danger d'explosion doivent retenir notre attention.

4.1 Hydrocarbures aromatiques polynucléaires

L'un des points les plus difficiles de l'évaluation des incidences sur l'environnement de la combustion du pétrole réside dans l'attribution d'un degré de gravité aux émissions d'hydrocarbures aromatiques polynucléaires. Ceux-ci sont un sujet de préoccupation, car ils présentent un danger cancérigène reconnu et ne sont biodégradables qu'à très long terme. Il n'existe aucune preuve concluante selon laquelle ils se concentrent dans les chaînes alimentaires, mais le doute subsiste toujours. Ils ne sont généralement pas considérés comme très actifs du point de vue écologique; la préoccupation principale demeure la santé humaine.

En raison de la nature brève et exploratoire de ce programme, nous sommes dans l'impossibilité de dégager des conclusions définitives, mais quelques observations s'imposent. Les hydrocarbures aromatiques polynucléaires sont à coup sûr présents dans le pétrole. Certains sont probablement oxydés en CO_2 , réduisant ainsi la quantité introduite dans l'environnement. D'autres sont probablement transportés par le crépitement de la combustion dans l'atmosphère avec les matières particulaires; et même si la quantité peut ne pas augmenter, la répartition sera modifiée. En outre, certains hydrocarbures aromatiques polynucléaires peuvent se former dans la zone de combustion et être émis sous forme particulaire ou gazeuse. La nature chimique des hydrocarbures aromatiques polynucléaires et de la suie est telle qu'il faut s'attendre à une adsorption rapide et irréversible des hydrocarbures aromatiques polynucléaires gazeux dans les particules de suie. La difficulté réside dans l'attribution d'une grandeur approximative à ces trois phases: c'est-à-dire, établir un bilan de masse et déterminer le lieu du dépôt en provenance de l'atmosphère.

La seule façon de déterminer ces quantités consiste à concevoir soigneusement une expérience dans laquelle les hydrocarbures aromatiques polynucléaires sont analysés

dans le pétrole; celui-ci est brûlé; et la suie et les résidus sont recueillis et analysés séparément pour déterminer la teneur en hydrocarbures aromatiques polynucléaires. Il serait ainsi possible de déterminer si la combustion augmente ou diminue les quantités d'hydrocarbures aromatiques polynucléaires. Il est recommandé de procéder à des travaux expérimentaux en ce domaine.

Il y a lieu de soupçonner que la fumée de pétrole renferme des concentrations d'hydrocarbures aromatiques polynucléaires plus élevées que celles provenant de combustions ordinaires classiques. La comparaison directe des concentrations de particules en suspension dans le panache et dans les centres urbains peut donner lieu à de fausses interprétations en ce qui concerne l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polynucléaires.

Les rapports de cause à effet liés aux problèmes écologiques posés par les émissions des hydrocarbures aromatiques polynucléaires sont loin d'être élucidés. Par conséquent, il est probablement prudent de réduire au minimum l'exposition des humains à ces éléments toxiques.

On peut se préoccuper du fait que la population des agglomérations comme celle de Tuktoyaktuk soit exposée à la suie, provenant de la combustion du pétrole, tandis qu'elle ne le serait pas si la combustion n'avait pas eu lieu. Les calculs de retombée de la suie laissent entrevoir que la majeure partie des matières particulaires se déposeront à moins de 10 km du feu. Le reste sera fort dilué au moment où il atteindra l'agglomération. Il faut signaler qu'il ne s'agit pas d'un cas d'exposition à la suite d'une combustion par rapport à une absence d'exposition; il existe déjà une combustion considérable aux hydrocarbures aromatiques polynucléaires, provenant de sources de combustion stationnaires et mobiles et de la combustion de déchets.

Plus au sud, les feux de forêts peuvent produire des émissions considérables d'hydrocarbures aromatiques polynucléaires; et à l'est, les Smoking Hills émettent des quantités appréciables de SO_2 et de suie par suite de la combustion naturelle des dépôts de lignites.

Toute déclaration sur la gravité du problème de l'exposition de l'être humain aux hydrocarbures aromatiques polynucléaires sera prématurée et subjective tant que des

données quantitatives n'auront pas été fournies sur les sources naturelles et anthropogènes, les quantités et les expositions. Par mesure de prudence, il est recommandé que l'exposition de l'être humain à la fumée de pétrole soit réduite au minimum en évitant les situations dans lesquelles les équipes de nettoyage se trouvent sous le vent d'un feu et dans lesquelles les vents dominants transportent les panaches de fumée directement dans les agglomérations. Il faut donc prévoir une coordination des opérations de combustion en fonction des prévisions météorologiques à court terme.

4.2 Métaux

Même si les concentrations de métaux dans la suie sont faibles et que les métaux les plus répandus ne sont pas considérés comme particulièrement toxiques, il est recommandé de faire preuve d'une certaine prudence dans l'exposition des humains à ces émissions de métaux. Certains métaux toxiques, comme le mercure ou le chrome, peuvent être présents. L'état de valence ou la spéciation chimique est inconnue, et comme la toxicité dépend étroitement de ces quantités, il est possible (bien qu'improbable) qu'un concours de circonstances inhabituelles et imprévues provoque une exposition nocive.

Encore une fois, il est recommandé de prendre des mesures pour réduire au minimum l'exposition des êtres humains aux panaches de fumée. Certaines inconnues subsistent sur l'évolution des métaux (par exemple, la fraction émise). Il serait utile de réaliser d'autres travaux en ce domaine.

4.3 Propriétés des hydrocarbures du Nord

Les concentrations de SO_2 et de métaux étudiées dans le présent rapport dépendent de façon linéaire des quantités présentes dans le pétrole. Le comportement du pétrole dans l'environnement dépend également de sa volatilité, de sa densité, etc.

Il est probable que les mêmes conclusions générales établies pour les conditions de juin s'appliquent à celles de septembre. La probabilité de superposition des panaches de fumée sera inférieure en septembre. Par conséquent, les concentrations atteintes seront légèrement inférieures.

Dès la découverte d'autres réserves de pétrole dans le Nord, il est recommandé d'obtenir des échantillons et de les analyser en vue de déterminer toutes les propriétés physiques et chimiques pertinentes permettant de faciliter l'évaluation des incidences environnementales de la combustion. Il convient en particulier de mesurer la volatilité, la densité, la rhéologie, la nature chimique (hydrocarbures saturés, aromatiques, etc., soufre, azote, oxygène et métaux).

4.4 Recherches à venir

Ce rapport présente les calculs des concentrations atmosphériques des matières polluantes en question. Ces calculs sont basés sur un grand nombre d'hypothèses. Il serait sans doute justifié de réaliser une combustion expérimentale de pétrole dans la région de la mer de Beaufort et de faire les mesures nécessaires des concentrations en vue de prouver l'exactitude des calculs donnés ici. Il est recommandé d'étudier la faisabilité et le coût de cette expérience.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. Abdelnour, R. et al., (Artec Canada Ltd) "Novel Countermeasures for an Arctic Offshore Well Blowout", Pêches et Environnement Canada, Ottawa. EPS-3-EC-77-14, (1977).
2. Berry, M.O. et al., "Weather, Waves and Icing in the Beaufort Sea". Projet de la mer de Beaufort, rapport technique n^o 21. Environnement Canada. Victoria, C.-B., (1975).
3. Burns, B.M., "The Climate of the Mackenzie Valley", vol. 1 et 2. Environment Canada. Atmospheric Environment Service Climatological Studies No. 24, (1973).
4. Coupal, B., "Report on Controlled Combustion Test Carried out near Rimouski". Environnement Canada. EPS-4-EC-76-2, (1976).
5. Csanady, G.T., Turbulent Diffusion in the Environment, D. Reidel, éditeur, (1973).
6. Service de la protection de l'environnement, "Rapport de surveillance nationale de la pollution atmosphérique". EPS-5-AP-76-16, (1976).
7. Pêches et Environnement Canada, "Critères pour les objectifs nationaux afférents à la qualité de l'air ambiant".
8. Freiburger, A. et J.M. Byers, "Burning Agents for Oil Spill Cleanup", rapport de la conférence sur les déversements de pétrole de l'API, Washington, D.C. (1971).
9. Ledbetter, J.O., Air Pollution: Part A Analysis. Marcel Dekker, Inc., New York, (1972).
10. Logan, W.J., D.E. Thornton et S.L. Ross, "Oil Spill Countermeasures for the Southern Beaufort Sea", rapports techniques sur le projet de la mer de Beaufort n^{os} 31a et 31b (annexe). Environnement Canada, Victoria, C.-B., (1975). Publiés également sous forme de rapports EPS-3-EC-77-6 et EPS-3-EC-77-7, (1977).

11. Lowry, W.P., "Tentative Model to Estimate Requirements for Rise of Large Smoke Plumes from Prescribed Burning". Présenté à la 5^e assemblée annuelle PNWIS, APCA, Salem, Oregon. AP 23LO6702. Novembre 1967.
12. Milne, A., "Offshore Drilling in the Beaufort Sea - A Preliminary Environmental Assessment", rapport technique sur le projet de la mer de Beaufort n^o 39. Environnement Canada, Victoria, C.-B., (1975).
13. Munn, R.E., J. Tomalain et R.L. Titus, "A Preliminary Climatology of Ground Based Inversion in Canada", Atmosphere 8,52, (1970).
14. Norcor Engineering and Research Ltd. "Probable Behaviour and Fate of a Winter Oil Spill in the Beaufort Sea". Environnement Canada. EPS-4-EC-77-5, (1977).
15. Norcor Engineering and Research Ltd. "The Interaction of Crude Oil with Arctic Sea Ice", rapport technique sur la mer de Beaufort n^o 27. Environnement Canada, Victoria, C.-B., (1975).
16. Pimlott, D., D. Brown et K. Som, "Oil Under the Ice". Canadian Arctic Resources Committee. Ottawa, (1976).
17. Portelli, R.V., "Data on Mixing Heights, Wind Speeds and Ventilation Coefficients for Canada", rapport interne n^o ARQT-4-76, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, (1977).
18. Purves, W.F. Arctec Canada Ltd. "Techniques for Igniting and Burning Oil on Arctic Ice", rapport d'Environnement Canada commandé par Approvisionnements et Services Canada, contrat n^o 02SS-KE204-6-EP20, (1977).
19. Ross, S.L., W.J. Logan et W. Rowland, "Oil Spill Countermeasures: The Beaufort Sea and the Search for Oil", Environnement Canada, Ottawa, (1977).
20. Seinfeld, J.H., Air Pollution: Physical and Chemical Fundamentals. McGraw-Hill, N.Y., (1975).

21. Shaw, R.W., M.S. Hirt et M.A. Tilley, "Persistence of Light Surface Winds in Canada", Atmosphere 10, (2), p. 33, (1972).
22. Singer, I.A., J.A. Frizzola et M.E. Smith, "The Prediction of the Rise of a Hot Cloud form Field Experiments". APCA J., No. 11. AP 23SI6041. Novembre 1964.
23. Somers, E.V., Dispersion of Pollutants Emitted into the Atmosphere , Air Pollution Control, Part I, Editor, Werner Strauss, Wiley-Interscience. New York, (1971).
24. Sugihara, J.M., "Trace Metal Constituents in Petroleum", conférence de l'API, 1962, section 8, Science & Technology, 42, p. 30, API, N.Y., (1962).
25. Turner, D.B., Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates USEPA Air Programs Pub. No. AP-26, (1974).
26. Walker, E.P. "Oil, Ice and Climate in the Beaufort Sea", rapport technique sur le projet de la mer de Beaufort n^o 35. Environnement Canada, Victoria, C.-B., (1975).
27. Walker, E.P. "Oil Pollution in the Canadian Arctic Ocean", document inédit. Environment Canada, Frozen Sea Research Group, Victoria, C.-B., (1976).
28. Williamson, S.J., Fundamentals of Air Pollution. Addison-Wesley, Mass., (1973).

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les personnes et les organismes suivants pour leur précieuse collaboration:

P. Blackall, J. Bober, W. Fitzgerald, W. Giza, R. Hancock, T.C. Hutchinson, R.E. Jervis, T. Munn, N. Paterson, S. Paterson, M.T. Scholtz, R. Portelli, D. Thornton, E. Turner, A. Watson, Metropolitan Toronto and Region Conservation Authority et BP Oil Limited.

ANNEXE A

ÉLÉVATION DU PANACHE DE FUMÉE

ANNEXE A

Élévation du panache de fumée

Les estimations de l'élévation du panache de fumée, provenant d'une combustion au niveau du sol, ont été obtenues à l'aide des formules de calcul de l'élévation du panache de fumée, décrites par Seinfeld (1975), Singer et al., (1964) et Lowry (1967). Il est difficile de préciser quelle est la meilleure formule de calcul d'élévation du panache de fumée. Par conséquent, l'élévation du panache de fumée a été calculée à l'aide des quatre formules et une moyenne a été utilisée pour les calculs ultérieurs. Le tableau 12 donne les équations utilisées pour effectuer les estimations.

TABLEAU 12 FORMULES DE CALCUL DE L'ÉLEVATION DU PANACHE DE FUMÉE

H(mètres)	Nom
$1.5\left(\frac{2rw}{u}\right) + 4 \times 10^{-5} \left(\frac{Q}{u}\right)$	Holland
$\frac{0.175 Q^{1/2}}{u^{3/4}}$	Concawe
$\frac{12.4 Q^{1/4}}{u}$	Lucas, Moore et Sparr
$\frac{1.02 Q^{1/3}}{u}$	Singer, Frizzola et Smith

Q émission de chaleur, (cal/s)

u vitesse moyenne du vent horizontal (m/s)

r rayon de la combustion (m)

w vitesse verticale du panache de fumée (m/s)

Une estimation de la vitesse verticale de l'élévation du panache de fumée peut être obtenue par la formule exposée par Lowry (1967).

$$w = \frac{Q}{(C_p/R)\pi r^2 p B}$$

où	C_p	la chaleur spécifique de l'air à pression constante, 1,0 joule/g ^o K
	R	constante des gaz pour de l'air sec, 0,29 joule/g ^o K
	πr^2	zone de combustion = 143 m ² ; r = 6,75 m
	P	pression barométrique, atmosphères
	B	$\frac{T_s - T_e}{T_s}$ poussée non dimensionnelle
	T_s	température moyenne du panache de fumée
	T_e	température ambiante

Les estimations de l'élévation du panache de fumée ont été basées sur l'hypothèse d'une combustion totale de 1,0 m³ de pétrole (5,8 x 10⁶ BTU/barils) en une période de 10 minutes, ce qui donne une émission de chaleur de 1,53 x 10⁷ cal/s. En supposant une poussée non dimensionnelle de 0,6 et une pression barométrique d'une atmosphère, on a obtenu une vitesse verticale du panache de 2,1 m/s. La substitution de ces valeurs estimées sur le site de combustion dans les formules de calcul de l'élévation du panache, à différentes vitesses du vent a donné les résultats indiqués au tableau 13.

TABLEAU 13 ÉLÉVATION CALCULÉE DU PANACHE DE FUMÉE H (mètres)

Vitesse du vent (m/s)	1	2	4	6	8
Holland	629	315	162	105	79
Concawe	685	407	242	179	144
Lucas <u>et al.</u> ,	781	391	195	130	98
Singer <u>et al.</u> ,	254	127	63	4	32
Briggs	226	179	142	124	113

Les résultats des calculs laissent entrevoir une marge d'erreur possible de 50 p. 100 dans les estimations de l'élévation du panache. Les valeurs moyennes ci-dessus de l'élévation du panache, à des vitesses de vent de un, deux, quatre, six et huit m/s ont été utilisées dans les calculs de dispersion.

ANNEXE B

CALCULS DES CONCENTRATIONS DE SO₂ AU NIVEAU DU SOL

ANNEXE B

Calculs des concentrations de SO₂ au niveau du sol

Les calculs des concentrations d'anhydride sulfureux au niveau du sol, provenant d'une combustion de 1,0 m³ de pétrole ont été effectués à l'aide des formules de dispersion atmosphérique exposées dans Turner (1974). Comme les hauteurs de mélange dans l'Arctique sont basses (approximativement de 300 à 400 m), on a utilisé une formule de dispersion qui tient compte de la réflexion des polluants entre le sol et une couche stable. La formule est la suivante:

$$\chi(X,0,0;H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left[-1/2(H/\sigma_z)^2 \right] + \sum_{N=1}^{N=4} \exp \left[-1/2 \frac{(H + 2NL)^2}{\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-1/2 \frac{(H-2NL)^2}{\sigma_z^2} \right] \right] \quad (1)$$

- où
- $\chi(X,0,0;H)$ - est la concentration au niveau du sol au centre (g/m³)
 - Q - la concentration de la source (g/s)
 - u - la vitesse du vent (m/s)
 - σ_y - le coefficient de dispersion horizontale (m)
 - σ_z - le coefficient de dispersion verticale (m)
 - H - l'élévation effective du panache (m)
 - L - la hauteur de mélange (m)

Une hauteur de mélange de 310 m a été choisie pour les calculs. Le temps de combustion utilisé a été de 10 minutes. Il a été supposé que tout le soufre (2 p. 100 du poids) était transformé en anhydride sulfureux, donnant ainsi une source de polluant d'une concentration de 55 g/s.

$$\frac{1,0 \text{ m}^3 \times 10^6 \times 0,83 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 0,2 \times \frac{64 \text{ poids moléculaire SO}_2}{32 \text{ poids moléculaire S}}}{600\text{s}} = 55 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

L'élévation du panache de fumée pour diverses vitesses du vent est tirée de l'annexe A. Les coefficients de dispersion pour les diverses classes de stabilité figurent au tableau 14 et les clés sont données au tableau 15.

TABLEAU 14 CLASSES DE STABILITÉ

Distance sous le vent km	B		D		E		F	
	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z
0.2	36	20	15	8.5	11	6.4	7.5	4
0.4	68	40	29	15	23	11	15.5	7
0.6	98	62	42	22	32	15	22	9.8
0.8	130	85	55	27	40	18	27.5	12
1	160	120	68	31	50	21	34	14
2	300	230	130	50	96	33	64	22
3	420	360	190	65	140	43	94	27
4	550	500	240	78	180	50	120	31
5	670	650	300	88	220	56	146	34
6	780	780	350	98	260	61	170	37
7	880	920	400	110	300	66	200	40
8	1000	1100	460	120	340	70	225	42
9	1100	1200	500	130	380	75	250	44
10	1200	1300	550	135	410	80	275	46
15	1700	2100	780	170	580	96	395	54
20	2200	2900	1000	200	760	110	500	60
25	2600	3800	1200	230	920	120	620	64
30	3000	4400	1400	250	1080	130	720	68
35	3500	5000	1600	270	1200	138	820	71
40	3900	6000	1800	290	1380	143	925	74

TABLEAU 15 CLÉS DES CLASSES DE STABILITÉ

Vitesse du vent de surface (à 10 m), m x sec ⁻¹	Jour			Nuit	
	Rayonnement solaire descendant			Légèrement couvert ou	
	Fort	Modéré	Léger	≥4/8 nuages bas	≤3/8 nuages
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

La classe neutre, D, devrait être attribuée au temps couvert pour le jour ou la nuit. Source : Turner (1974).

Un programme informatique APL, voir ci-dessous, a été utilisé pour calculer les concentrations d'anhydride sulfureux et pour représenter sous forme graphique les concentrations au centre en fonction de la distance. Les résultats des calculs pour différentes conditions météorologiques sont présentés sous forme tabulaire et graphique.

∇Burn O Σ∇

∇ U Burn Q

- (1) ' plume rise (meters) ' ; H←0
- (2) ' mixing height (meters) ' ; L←0
- (3) X← 0.2 0.4 0.8 1 5 10 15 20 30 40
- (4) Y← 15 29 55 68 300 550 780 1000 1400 1800
- (5) Z← 8.5 15 27 31 88 135 170 200 250 290
- (6) N←0
- (7) S← 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
- (8) A←Q÷(3.1416 x U x Y x Z)
- (9) B←*(-0.5 x ((H÷Z)*2))
- (10) N←N+1
- (11) C←*(-0.5 x (((H+(2 x N x L))÷Z)*2))
- (12) D←*(-0.5 x (((H-(2 x N x L))÷Z)*2))
- (13) E←C+D
- (14) S←S+E

ANNEXE C

CALCULS DES CONCENTRATIONS ET DES VITESSES DE DÉPÔT DE LA SUIE AU NIVEAU DU SOL

ANNEXE C

Calculs des concentrations et des vitesses de dépôt de la suie au niveau du sol

Les calculs des concentrations de la suie sous le vent ont été effectués à l'aide d'une formule de dispersion exposée par Somers (1971). La dispersion des matières particulaires émises diffère de celle des polluants gazeux en ce sens que la décantation des particules se fait par gravité. Généralement, lorsqu'elles touchent le sol, il ne se produit pas d'effet de réflexion par le vent. La concentration des particules de suie au niveau du sol peut être calculée à l'aide du modèle de "panache incliné" qui tient compte des vitesses de décantation des particules et qui est exposé ci-après.

$$(X,0,0;H) = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \left[\exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{H-XW/u^2}{\sigma_z} \right)^2 \right) + \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{H+2L-XW/u^2}{\sigma_z} \right)^2 \right) \right]$$

où Q_p est la force de la source des particules (g/s) et
 W est la vitesse de décantation des particules (m/s).

Les autres termes sont expliqués à l'annexe B.

Le premier terme exponentiel est la source d'émission primaire. Le deuxième tient compte de la réflexion des particules de suie par la couche à inversion.

Ce procédé est valable pour les gaz et les particules ayant de très faibles vitesses de décantation, par exemple des particules ayant des vitesses rapides de décantation se diffusent à la partie supérieure de la couche mélangée. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un terme de réflexion. En effet, un terme de réflexion entraîne une surestimation du dépôt de la suie d'un facteur de deux environ, par suite de la méthode mathématique utilisée, si une deuxième source fictive se trouvant au-dessus de la couche mélangée entre en ligne de compte. L'utilisation ou l'exclusion du terme de réflexion dépend donc de la vitesse de décantation. La méthode adoptée dans cette étude a consisté en général à utiliser le terme de réflexion, mais à interpréter les résultats tout en tenant

compte de la surestimation probable des dépôts et des concentrations dans le cas des grosses particules. Les vitesses de décantation pour des particules de 100, 30, 10 et 1 microns ont été tirées de Ledbetter (1973). Il a été supposé que 6 p. 100 (poids) du pétrole ont été transformés en suie (Annexe A), ce qui donne une source de suie d'une concentration de 83 g/s. La concentration multipliée par la vitesse de décantation des particules donne un dépôt au centre G_C , masse par superficie unitaire et temps.

$$G_C = \chi \times w$$

Il peut être démontré que G_M , la vitesse moyenne de dépôt au centre, au niveau du sol, prend la valeur suivante:

$$G_M = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} G_C = 0.626 G_C$$

Il est possible d'obtenir une estimation de la fraction de retombée (F) de la suie qui se dépose dans les limites de l'incrément de la distance (ΔX) sous le vent comme suit:

$$F = \frac{G_M \times 2.67\sigma_y X \Delta X}{Q_p}$$

Les deux tiers de l'intervalle $4\sigma_y$ comportent 95 p. 100 de la matière décantée. La division de la superficie de combustion en incréments paraît à la figure A3.

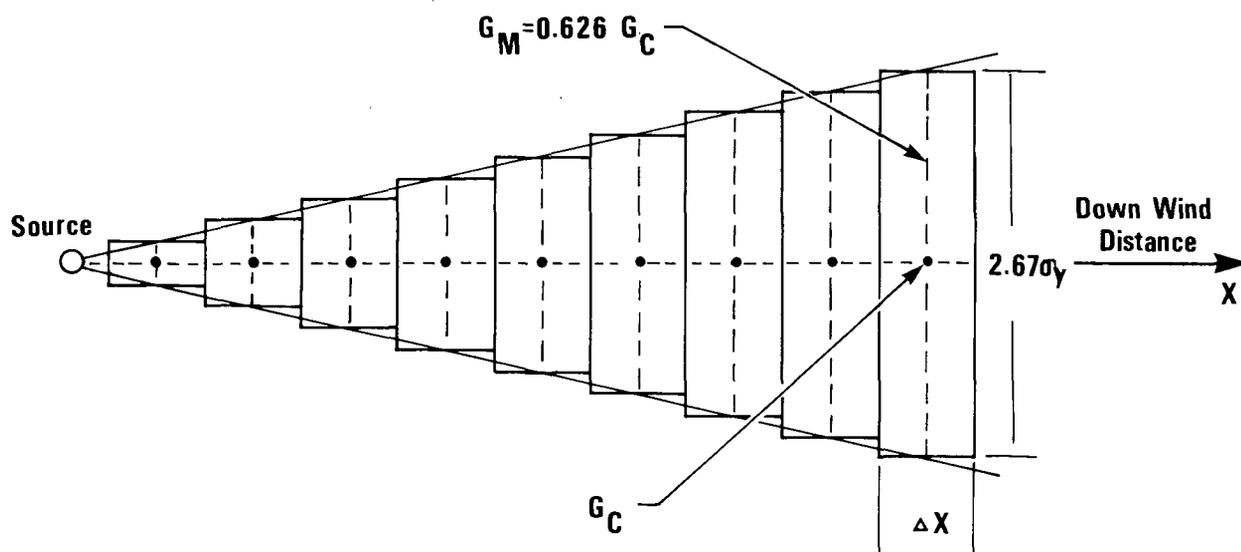


FIGURE 31 DIVISION DE LA SUPERFICIE DE COMBUSTION EN INCRÉMENTS

Le programme informatique APL qui figure ci-dessous a servi à calculer les concentrations, les vitesses de dépôt, les fractions de retombée et la retombée totale pour des distances allant jusqu'à 40 km. Les résultats des calculs pour différentes conditions météorologiques, sont présentés sous forme tabulaire et graphique.

```

▽ U Soot Q
(1) ' Plume rise (meters) ' ;H←0
(2) 'Mixing height (meters) ' ;L←0
(3) 'Settling velocity (meters/sec) ' ;W←0
(4) 'Source strength (grams/sec) ' ;Q
(5) 'Wind speed (meters/sec) ' ;U
(6) X← 0.2 0.4 0.6 0.8 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 15 20 25 30 35 40
(7) ΔX← 200 200 200 200 600 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
      1000 3000 5000 5000 5000 5000 5000 5000
(8) Y← 36 68 98 130 160 300 420 550 670 780 880 1000 1100 1200
      1700 2200 2600 3000 3500 3900
(9) Z← 20 40 62 85 120 230 360 500 650 780 920 1100 1200 1300
      2100 2900 3800 4400 5000 6000
(10) X1←1000 x X
(11) A←Q÷(6.283 x U x Y x Z)
(12) B←H-(W x X1)÷U
(13) C←*(-0.5 x ((B÷Z)*2) )
(14) D←*(-0.5 x (((B+(2 x L) )÷Z)*2) )
(15) Conc←A x (C+D)
(16) GCL←Conc x W
(17) GAVG←GCL x 0.62666
(18) QS←GAVG x 2.67 x Y x ΔX
(19) FRACTION←QS÷Q
(20) 'Integrated source strength (grams/sec) ' ;(+/QS)
(21) 'sum of fractions' ;(+/Fraction)
(22) N←X, Conc, GCL, GAVG, Fraction
(23) Data←ϕ 5 20 pN
(24) ' '
(25) ' Distance Conc GCL GAVG Fraction '
(26) Data
(27) ▽ 25 72 Plot Conc VS X

```