

**IFREMER**  
**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT**  
**ET DE L'AMENAGEMENT LITTORAL**

**AGENCE DE BASSIN RHONE - MEDITERRANEE - CORSE**

**TRANSPORT ET MELANGE D'UN REJET URBAIN**  
**DANS LE MILIEU MARIN**  
  
**MER MEDITERRANEE**

**B. THOUVENIN**

IFREMER-DERO/EL



0EL04507



**DRO/EM/90-01**

# IFREMER

**Adresse :**

IFREMER  
Centre de Toulon  
Zone Portuaire de Brégaillon  
BP 330  
83507 LA SEYNE SUR MER Cédex

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'AMENAGEMENT LITTORAL

SERVICE

LABORATOIRE : DEL/TOULON

<b>AUTEUR (S) :</b>  B. THOUVENIN		<b>CODE :</b> DRO/EM 90-01  <b>DATE :</b> MARS 92
<b>TITRE :</b> <b>TRANSPORT ET MELANGE D'UN REJET URBAIN DANS LE MILIEU MARIN - MER MEDITERRANEE</b>		Tirage nbre: 50 Nb pages 139 Nbre annexes : 5
<b>CONTRAT (intitulé)</b>  N° <u>86 3 430 01 RT</u>	<b>REJETS URBAINS EN MER</b>	<b>DIFFUSION</b>  libre : X restreinte : confidentielle :

**RESUME:**

Dans le cadre du programme national "REJETS URBAINS EN MER", développé par l'IFREMER, en collaboration avec l'Agence de Bassin Rhône Méditerranée Corse, des études sur le comportement d'un effluent émis par un émissaire en profondeur ont été réalisées. Complétant des mesures courantométriques et hydrologiques de longue durée, en un point à la sortie de l'émissaire de TOULON EST, deux modèles mathématiques ont été appliqués pour reproduire et étudier le rejet pendant les deux étapes de dilution.

· Le modèle JET, développé par la SOGREAH, a été testé et comparé avec des mesures in situ. Les variations des résultats en fonction des conditions du milieu rencontrées pendant un cycle annuel ont été étudiées.

Un modèle de transport et mélange multicouches a été appliqué dans une zone de un à deux kilomètres autour de l'émissaire. Les courants y sont supposés connus et uniformes horizontalement, variables dans le temps et sur la profondeur. Ce modèle montre l'importance des états transitoires par rapport à des situations théoriquement stationnaires, supposés caractéristiques d'un certain type de temps. L'utilisation du modèle pour le calcul de la dilution des détergents et des germes tests a permis de visualiser la zone d'impact autour du rejet.

Mots clés : Rejet urbain, Modèle mathématique, Rade de Toulon, Dispersion, Contamination

# SOMMAIRE

## TRANSPORT ET MELANGE D'UN REJET URBAIN DANS LE MILIEU MARIN MER MEDITERRANEE

<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>I. PRESENTATION DES MODELES</b>	3
I.1 MODELE DU JET ET PANACHE	5
I.2 TRANSITION ENTRE LE PANACHE ET L'ECOULEMENT GENERAL	9
I.3 MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE DANS LA ZONE D'ETUDE	12
<b>II. ANALYSE DE SENSIBILITE DU PROGRAMME JET A DIFFERENTES     CONDITIONS DU REJET ET DU MILIEU RECEPTEUR</b>	17
<b>INTRODUCTION</b>	17
<b>RESULTATS</b>	22
II.1 DISTANCE AU REJET	23
II.2 PROFONDEUR DE CAPTAGE	23
II.3 DIAMETRE	26
II.4 EPAISSEUR	28
II.5 HAUTEUR DU DOME	28
II.6 DILUTION	30
II.7 FLUX DE CONCENTRATION INTRODUITS PAR LE REJET	32
II.8 TEST SUR LES COURANTS	33
II.9 INFLUENCE DE LA DENSITE DE L'EFFLUENT ET DE LA DENSITE DU FOND	34
II.10 INFLUENCE DU DEBIT DE L'EFFLUENT	34
II.11 UTILISATION DES ABAQUES SIMPLIFIEES DE LA SOGREAH	38
<b>SYNTHESE DE L'ANALYSE</b>	41
<b>III. ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE DE TRANSPORT ET     MELANGE AUX CONDITIONS DU MILIEU</b>	45
III.1 CONDITION LIMITE DU MODELE DANS LA ZONE DU REJET	45
III.2 INFLUENCE DU COEFFICIENT DE DISPERSION HORIZONTALE	46

III.3 INFLUENCE DU COURANT HORIZONTAL DANS LES COUCHES	48
III.4 ECHANGES VERTICAUX ENTRE LES COUCHES	54
1. DIFFUSION VERTICALE	54
2. VITESSE VERTICALE DE CHUTE	55
3. ECHANGES VERTICALES ENTRE LES COUCHES ANIMEES DE COURANTS DIFFERENTS EN INTENSITE ET DIRECTION	60
III.5 COURANTS VARIABLES DANS LE TEMPS	60
III.6 INFLUENCE DU DEBIT DE L'EFFLUENT	62
III.7 INFLUENCE DES TRANSFORMATIONS POUR UN PARAMETRE NON CONSERVATIF	66
1. FLOCCULATION-SEDIMENTATION	68
2. MORTALITE DES BACTERIES	
INFLUENCE DE LA LUMIERE	70
<b>IV. APPLICATION DES MODELES AUX CAMPAGNES DE MESURES EN MER</b>	79
IV.1 CAMPAGNES EN MILIEU HOMOGENE	79
1.1 CAMPAGNE C6 DU 29 AVRIL 1988	80
1.2 CAMPAGNE C7 DU 27 AVRIL 1988	88
1.3 CAMPAGNE C2 DU 16 OCTOBRE 1986	92
1.4 CAMPAGNE C4 DU 19 JUIN 1987	96
IV.2 CAMPAGNES EN MILIEU STRATIFIE	100
2.1 CAMPAGNE C1 DU 19 JUIN 1986	100
2.2 CAMPAGNE C5 DU 8 SEPTEMBRE 1987	104
<b>V. APPLICATION DES MODELES AU CYCLE ANNUEL DE MESURES</b>	
<b>    CALCUL DU FLUX ANNUEL SORTANT DE LA ZONE D'ETUDE</b>	113
V.1. APPLICATION DU PROGRAMME JET AUX MESURES IN SITU	113
V.2. APPLICATION DU MODELE TRANSPORT ET MELANGE AUX SCENARIOS TYPES	120
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	135

**TRANSPORT ET MELANGE D'UN REJET URBAIN  
DANS LE MILIEU MARIN**

**MER MEDITERRANEE**

## INTRODUCTION

Cette étude se situe dans le cadre d'un programme d'études sur le devenir des rejets urbains en mer. Ce programme coordonné par l'IFREMER, et supporté financièrement par l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, s'est déroulé de 1986 à 1990 et a donné lieu à de nombreuses études pluridisciplinaires. Un des objectifs proposés était d'évaluer les flux polluants quittant la zone d'étude sous forme dissoute et particulaire.

La zone d'étude est définie comme étant la zone de dilution où les concentrations d'une majorité de paramètres issus du rejet sont mesurables ou atteignent le bruit de fond, et où des processus de transformation peuvent se produire.

Complétant les études sur les apports par la station d'épuration, et sur les effets des polluants sur les organismes, les recherches sur les mécanismes de transport et de dilution autour du rejet permettent de mieux comprendre les différents phénomènes qui agissent sur l'effluent pendant son passage à l'interface rejet-eau douce/mer-eau salée et qui déterminent son devenir ultérieur en mer.

Ce devenir dépend des caractéristiques physico-chimiques du milieu récepteur et de celles du rejet lui-même. Les études se sont donc focalisées sur deux sites représentant les deux principaux types de rejet que l'on retrouve communément sur le littoral français :

- un site atlantique (MORLAIX) représentatif d'un rejet en surface qui, après un traitement biologique, est introduit dans un estuaire à marée, turbide.

- un site méditerranéen (TOULON) représentatif d'un rejet subissant un traitement physico-chimique, introduit par un émissaire profond dans un milieu non turbide et soumis à des courants variables et faibles.

Le présent rapport concerne l'étude du transport et du mélange de l'effluent de TOULON-EST, rejeté à travers un émissaire par 44 mètres de profondeur. —

Cet effluent subit, après une légère dilution pendant son transport de la station à la mer, un mélange intense pendant sa remontée du fond vers la surface, puis il est transporté et dilué par les courants horizontaux.

En Méditerranée, ces courants sont très variables dans le temps et l'espace et les moyens d'étudier le comportement d'un effluent dans un tel milieu sont limités car :

- l'exploitation des mesures ponctuelles est difficilement généralisable à cause des conditions du milieu très variables et non périodiques ;

- les mesures de longue durée en continu ne sont possibles que pour certains paramètres du milieu, non caractéristiques du comportement de l'effluent ;

- le suivi des polluants dans le temps et dans l'espace est rendu difficile par leur seuil de détection, et par l'hétérogénéité et les fluctuations du milieu récepteur ;

- la modélisation du transport et du mélange de l'effluent demande des outils très complexes pour prendre en compte les variations spatio-temporelles du système. Les simplifications et les hypothèses généralement utilisées pour approcher le problème ne sont pas toujours appropriées pour évaluer les risques et les impacts du rejet sur le milieu.

L'IFREMER a tenté dans cette étude d'utiliser quelques outils de modélisation déjà existants et de les confronter aux mesures sur le milieu. Ils ont été également utilisés pour tester la sensibilité du comportement de l'effluent en fonction des caractéristiques du rejet et des conditions environnementales.

Deux modèles ont été choisis pour reproduire les mécanismes de mélange de l'effluent correspondant aux deux étapes de dilution dont les échelles spatio-temporelles sont différentes. Ils ont été adaptés en fonction des observations faites sur le milieu et sur le comportement de l'effluent en mer.

A cet effet, un programme de mesures de longue durée a été mené sur la zone proche de l'émissaire de Toulon Est:

- des mesures de courants et de températures ont été réalisées pendant un an et demi en différentes profondeurs pour connaître les variations hydrodynamiques et hydrologiques du milieu récepteur (THOUVENIN et al 1988) ;

- plusieurs campagnes pluridisciplinaires ont été menées en marquant l'effluent à l'aide de traceurs radioactifs ou fluorescents afin de suivre son évolution pendant plusieurs heures (BRISSET et al 1986-1987 ; RAMADE 1988).

L'IFREMER s'est efforcé d'utiliser les acquis de ces dix dernières années en matière de modélisation et de calcul de la dilution des rejets, notamment les résultats des travaux de la SOGREAH.

Le modèle de calcul des JETS et PANACHES, développé par la SOGREAH, a été utilisé ici; amélioré par la SOGREAH dans le cadre de ce programme, et testé dans différentes situations. Une étude de sensibilité aux conditions du milieu, en terme de courants et stratification, a permis de décrire les variations que peut subir le panache de rejet pendant sa remontée au cours de l'évolution journalière ou saisonnière du milieu récepteur.(Chapitre II)

Un modèle de transport et mélange, en couches, a été utilisé pour calculer le comportement de l'effluent étalé à une certaine profondeur et soumis aux courants horizontaux, variables en profondeur et dans le temps. Ces courants ne sont pas calculés par un modèle hydrodynamique; ils sont donnés à partir des mesures et supposés uniformes sur la zone d'étude, étendue à un à deux kilomètres autour du rejet. Une étude de sensibilité a été également réalisée afin d'observer la réponse du mélange de l'effluent aux variations du milieu (Chapitre III).

La comparaison des résultats des calculs avec ceux des campagnes de mesures a permis de vérifier les modèles et d'en évaluer les performances et les limites (chapitre IV).

Dans le chapitre V, les modèles sont appliqués aux observations de longue durée faites dans le milieu. Le comportement de l'effluent est reproduit sur des scénarios types rencontrés pendant un cycle annuel. Le modèle de transport et mélange est également appliqué à des polluants non conservatifs tels que les bactéries pathogènes. Des exemples d'application sont décrits montrant la zone d'impact d'un rejet tel que celui de TOULON.

## CHAPITRE I

### PRESENTATION DES MODELES

Le calcul de la dilution et du transport d'un effluent rejeté en mer par un émissaire en profondeur est réalisé à l'aide de modèles. Trois étapes ont été caractérisées donnant lieu à des calculs spécifiques correspondant à différents écoulements (*figure 1.1*).

#### - Remontée de l'effluent du fond vers la surface.

L'écoulement de type "jet ou panache" est très turbulent. Le mélange est dû principalement à la mécanique de jet et à l'entraînement de l'eau de mer par celui-ci. Au départ, le moteur de l'écoulement est la quantité de mouvement initiale du jet émis à partir d'un orifice et avec une certaine vitesse - c'est la partie "jet". Ensuite, dans le panache, l'écoulement est dû principalement aux forces de gravité induites par les différences de densité entre le fluide rejeté et le milieu ambiant. Beaucoup d'études ont été conduites pour tenter de reproduire ces écoulements. Des modèles simples ont été développés, notamment par la SOGREAH.

#### - Etalement en surface ou à une profondeur donnée.

Si le panache atteint la surface avec un reliquat de flottabilité positive, il s'étale radialement sur une couche d'épaisseur variable jusqu'à ce qu'il perde son énergie propre et soit transporté passivement par les courants existants dans le milieu.

Si sa densité s'égalise avec celle du milieu ambiant, il est capté à la profondeur correspondante. On observe alors un effet de dôme et une retombée de l'effluent sur les côtés; il s'écoule ensuite en une nappe à peu près horizontale.

Les modèles "jet-panache" ne sont plus applicables pour reproduire la transition entre le mouvement vertical de remontée du panache et son transfert en une couche horizontale; un calcul approché est nécessaire pour obtenir les flux effectifs introduits aux différentes profondeurs sur la colonne d'eau et leur répartition spatiale résultant de la combinaison entre les vitesses radiales dues au rejet et les courants moyens.

#### - Transport par les courants - Mélange horizontal et vertical

Lorsque le panache a perdu son énergie propre, il est soumis à des mouvements quasi horizontaux. Il devient un "nuage", qui selon son épaisseur et sa profondeur va être transporté par des courants variables en intensité et en direction en fonction du temps et de la profondeur. D'autre part, il se mélange horizontalement et verticalement par diffusion; la diffusion verticale dépend par ailleurs de la stratification de densité dans le milieu.

Les courants étant donnés, il existe un certain nombre de modèles qui reproduisent ce transport horizontal. Les calculs sont assez simples si on utilise des hypothèses simplificatrices; ils peuvent ainsi être résolus de façon analytique en considérant un courant uniforme et constant dans le temps et l'espace, avec un effluent bien mélangé sur la profondeur et un régime permanent dans un milieu infini. Dès que l'on veut prendre en compte la variabilité spatiale ou temporelle des courants ou des flux introduits dans le milieu récepteur par le rejet, il faut utiliser des modèles plus complexes.

En Méditerranée, l'importance de la variabilité des courants sur la profondeur oblige à considérer le problème dans sa tridimensionnalité. Un modèle à deux dimensions (x,y) (SALOMON 1980) a donc été adapté pour reproduire le transport et le mélange du nuage dans différentes couches horizontales animées chacune par un courant uniforme dans l'espace horizontal.

Figure I.1

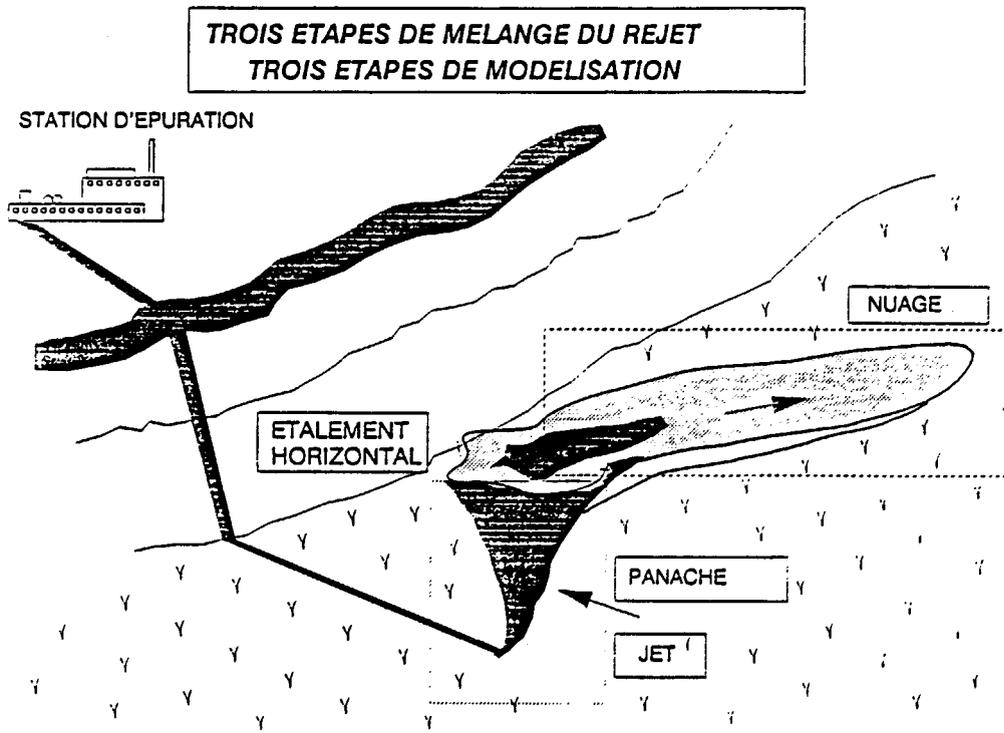
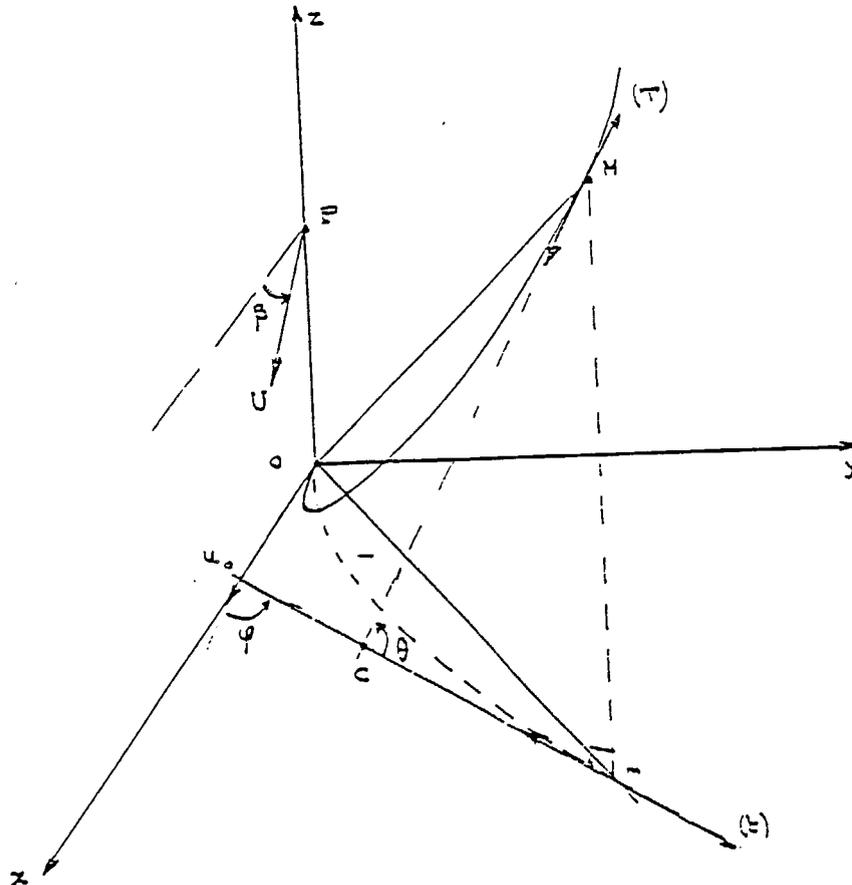


Figure I.2

Système de coordonnées utilisé dans le programme JET (SOGREAH)



## I.1 - MODELE DU JET ET DU PANACHE

Il existe plusieurs sortes de modèles pour reproduire ce type d'écoulement, et de nombreuses études expérimentales en laboratoire ont permis de les valider.

Les plus complets cherchent à modéliser la turbulence qui représente un facteur prépondérant dans la dispersion de l'effluent au cours de sa remontée. Mais ces modèles, parfois très complexes, sont surtout destinés à des recherches spécifiques portant sur la structure de ces écoulements. D'autre part, ils demandent un grand nombre de données expérimentales notamment sur la turbulence du milieu récepteur, données qui sont très difficiles à obtenir dans le milieu marin.

Les modèles les plus utilisés sont des modèles simples qui font un certain nombre d'hypothèses et d'approximations basées sur des observations effectuées en laboratoire. La turbulence n'est pas modélisée et le jet est reproduit en valeurs moyennes et de façon stationnaire. La trajectoire et les caractéristiques des paramètres du rejet ne se définissent que statistiquement. En effet, la structure de tels écoulements, fortement turbulents, est faite de bouffées successives et il n'est pas possible de reproduire ces variations de très petite échelle dans le temps et l'espace.

Les mesures par prélèvements en mer dans un panache de remontée sont toujours ponctuelles et quasi instantanées, c'est pourquoi il est difficile de vérifier précisément les résultats théoriques correspondant à des moyennes statistiques. Néanmoins ces modèles sont universellement reconnus pour leur bonne précision. Ils sont simples à utiliser et peu coûteux.

La SOGREAH (1983) a développé un tel modèle et a traduit en abaques les lois qui décrivent l'écoulement du jet puis du panache. Ces abaques sont faciles à utiliser mais ils n'existent que pour les cas simples où le milieu est au repos, homogène en densité ou stratifié linéairement, ou bien dans le cas d'un milieu homogène mais animé d'un courant moyen constant sur la profondeur.

En Méditerranée, les conditions du milieu sont beaucoup plus complexes, le gradient de densité est rarement constant sur la profondeur (existence plutôt d'une thermocline) et le courant essentiellement dû au vent est très variable en intensité et direction de la surface au fond.

Pour étudier les différents cas types de stratification de densité, et pour évaluer la variabilité des résultats en fonction des différentes conditions existantes en mer, le modèle JET de la SOGREAH a été utilisé. Mais, à la demande de l'IFREMER, il a été adapté par la SOGREAH pour tenir compte des effets de frottement et de force de Coriolis qui induisent une courantologie variable et tournante sur la profondeur. La trajectoire du jet devient tridimensionnelle et les équations ont dû être réécrites.

Cette extension du modèle JET a fait l'objet d'un rapport de la SOGREAH(1988) et nous ne reviendrons pas sur les équations de base du modèle et les hypothèses utilisées qui sont par ailleurs classiques et déjà largement diffusées dans la littérature (SOGREAH 1988 - ABRAHAM 1963 et 1971 - FAN et BROOKS 1967 et 1969 - MORTON, TAYLOR et TURNER 1956 - CHU et GOLDBERG 1974).

Retenons cependant les hypothèses qui nous semblent importantes pour son application :

- hypothèse d'axisymétrique et de répartition gaussienne des vitesses et des concentrations.
- milieu infini - pas d'interférence avec une paroi solide
- effet de courbure de la trajectoire faible
- stratification densimétrique du milieu récepteur non affectée par le jet.
- vitesse d'émission du jet au minimum quatre fois supérieure à celle du milieu récepteur

Le système de coordonnées utilisé est le suivant (*figure I.2*) :

- le centre de coordonnées est le centre de l'orifice d'émission du jet
- l'axe Ox horizontal est dirigé selon le vecteur vitesse du jet à l'émission
- l'axe Oz vertical est dirigé du fond vers la surface
- les angles utilisés sont :
  - \* les angles définissant la trajectoire du jet :
    - angle  $\Theta$  : tangente à la trajectoire du jet avec sa projection sur le plan horizontal
    - angle  $\phi$  : projection sur le plan horizontal de cette tangente avec l'axe Ox
  - \* l'angle définissant la direction du courant horizontal dans le milieu récepteur :
    - angle  $\beta$  : direction du courant avec l'axe Ox

Une version du programme a été adaptée sur station de travail SUN sous forme de menus permettant une utilisation aisée du logiciel. Des tracés sont réalisés à la suite du calcul afin de visualiser directement les résultats (PIGNATEL 1989 - *figure I.3*).

Un certain nombre de données sont nécessaires pour le calcul, elles peuvent être divisées en plusieurs groupes (*figure I.4*) :

\* les paramètres du rejet :

- . le diamètre  $d_0$  de l'orifice d'émission
- . le débit du jet  $q_0$  ou sa vitesse d'émission  $u_0$
- . l'angle du jet par rapport à l'horizontale  $\Theta_0$
- . la densité initiale  $\rho_{01}$  de l'effluent
- . la cote  $z_e$  d'émission du jet par rapport à la surface

\* les données du milieu récepteur :

- . la profondeur du milieu H
- . les vitesses et directions  $(U(z), \beta(z))$  du courant en différentes profondeurs repérées de la surface vers le fond
- . la stratification densimétrique caractérisée par les densités  $\rho_{0a}(z)$  (ou les salinités + températures) en différentes profondeurs repérées de la surface vers le fond

D'autres données internes au calcul ou à l'édition des résultats sont utilisées. Des valeurs par défaut leur sont affectées. Elles peuvent être modifiées en option par l'utilisateur si cela est nécessaire (voir Annexe 1).

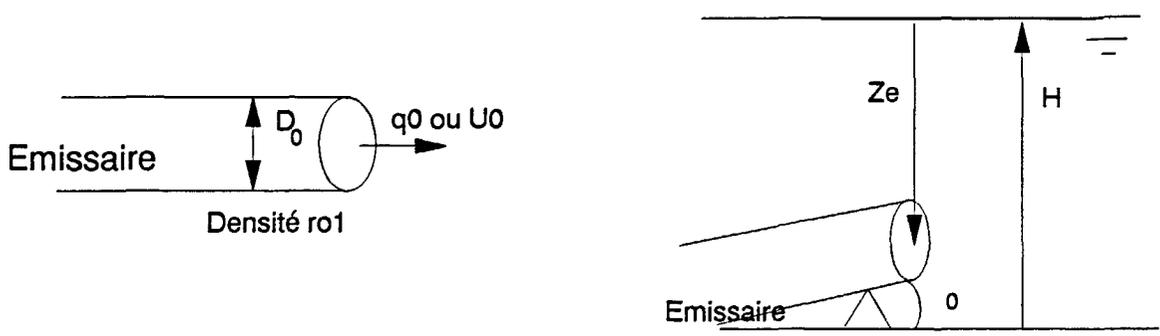
Le diamètre  $b$  du panache, calculé par le modèle, est défini comme étant le diamètre du cercle contenant 84% de la masse rejetée. La dilution est égale au rapport entre la concentration du polluant à la sortie de l'émissaire et sa concentration sur l'axe à une profondeur donnée. Elle correspond à un rapport de débit (celui du panache sur celui de l'effluent); le débit dans la section du panache étant calculée à travers une surface comprenant 84% de la masse.

Les résultats du modèle, fournis en fonction de la profondeur, du fond jusqu'à la surface ou jusqu'à sa côte d'équilibre, sont les suivants (*figure I.4*):

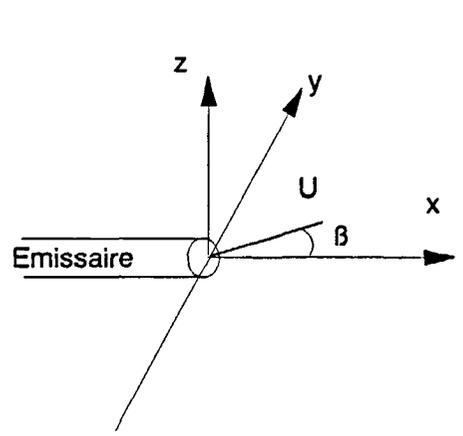
- la trajectoire du jet ou panache donnée par ses coordonnées  $(x, y, z)$ .
- sa densité  $\rho_0$
- la dilution  $D_L$  (84%)
- la vitesse sur l'axe  $u(s)$
- le débit du rejet  $Q$  (84%)
- le diamètre  $b$  du panache (84%)
- les angles  $\Theta$  et  $\phi$  que font la tangente à la trajectoire du jet avec sa projection sur le plan horizontal, et cette projection avec l'axe Ox.

FIGURE I.4

**LES PARAMETRES DU REJET**

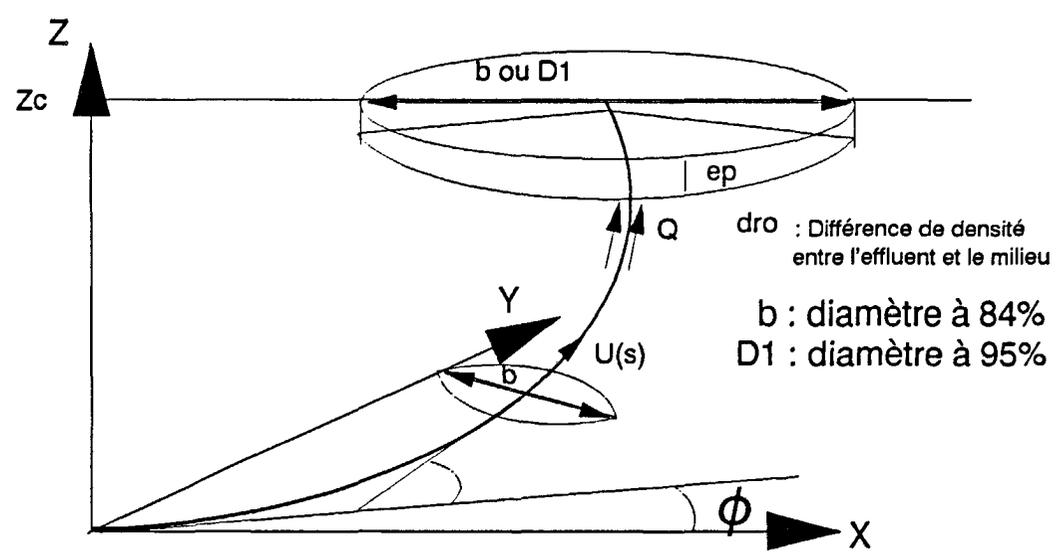


**LES DONNEES DU MILIEU**



	Courants	Densités
↑ DZ	$U(n)$ $B(n)$	$\rho_{oa}(n)$
↑ DZ	$U(3)$ $B(3)$	$\rho_{oa}(3)$
	$U(2)$ $B(2)$	$\rho_{oa}(2)$
↑ DZ	$U(1)$ $B(1)$	$\rho_{oa}(1)$

**LES RESULTATS DU MODELE**

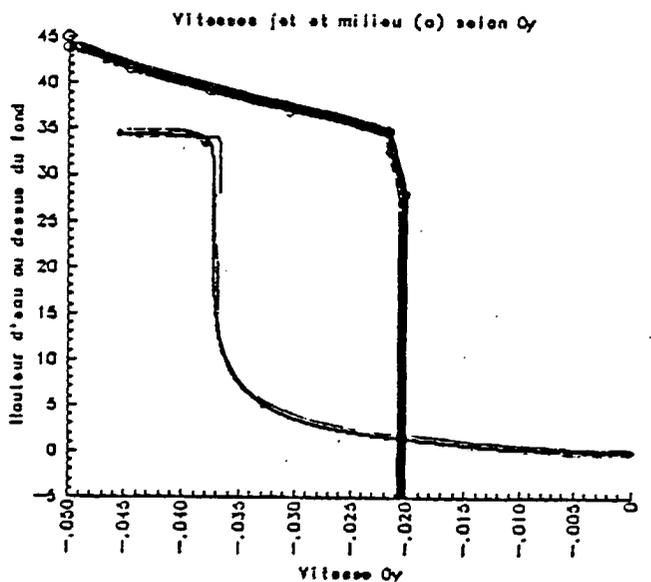
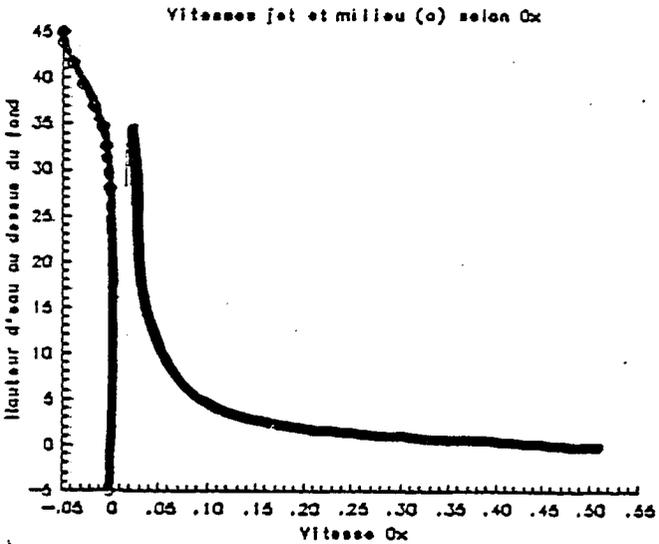
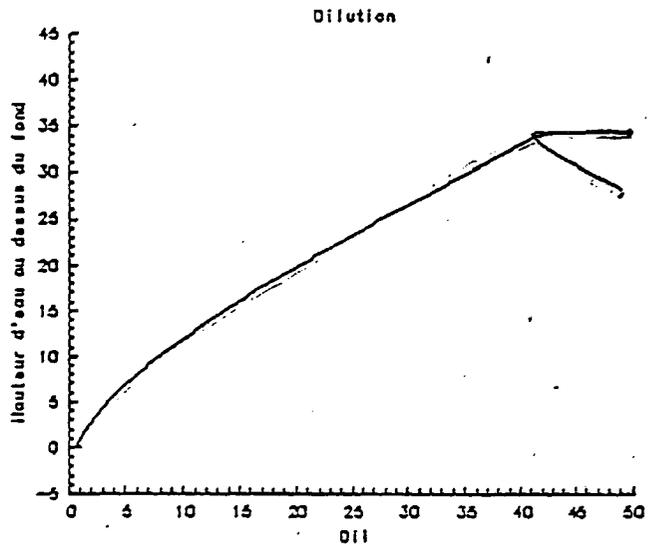
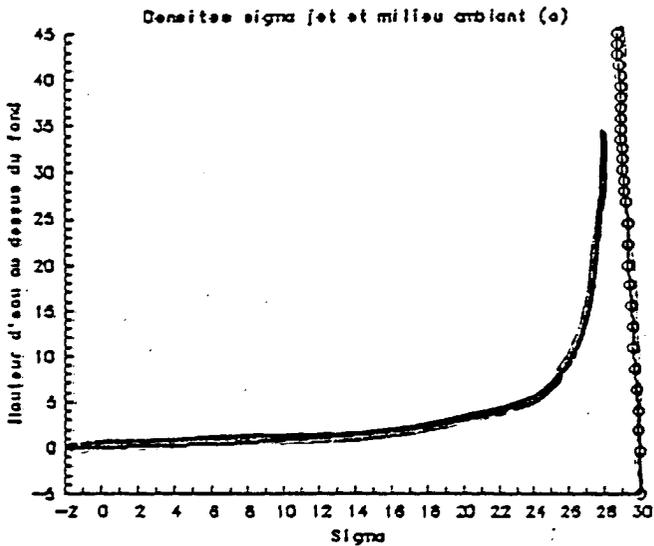
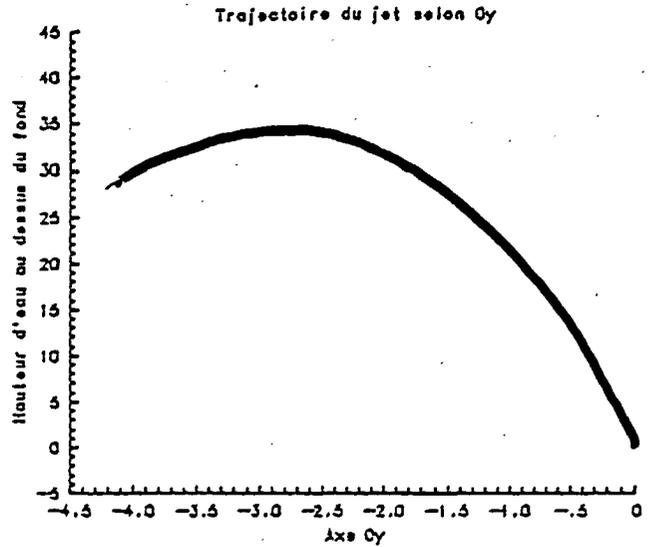
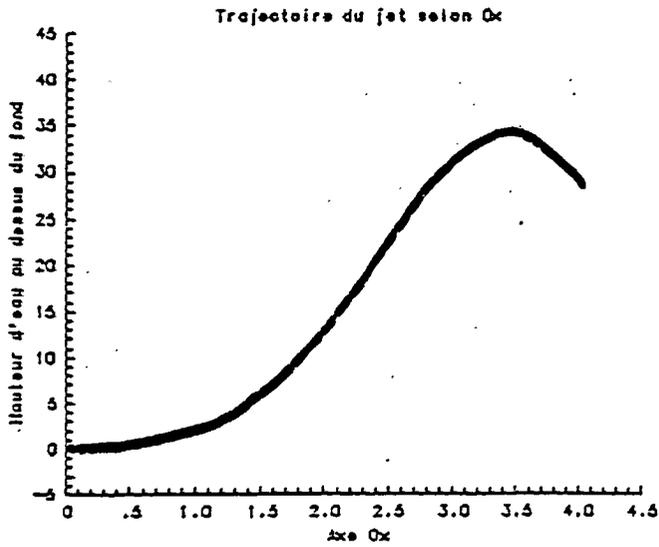


IFREMER \*\* JET TRIDIMENSIONNEL  
JET MIS HORIZONTALEMENT  
CAMPAGNE CI DU 19 JUIN 1988

Debit du rejet : 0.1200 m<sup>3</sup>/s  
Diametre de l'orifice : 0.5700 m

Profondeur d'emission : 43.5000 m  
Densite initiale : 0.9981 t/m<sup>3</sup>

8



++ LE PANACHE EST BLOQUE EN PROFONDEUR ++

Epaisseur finale du panache : 3.24	m	Diametre final du panache : 14.28	EE
Debit du panache : 9.76	m <sup>3</sup> /s	Cote de blocage : 15.23	EE
Vitesse horizontale du panache : 0.06	m/s	Hauteur du dme : 6.19	EE
		Cote superieure du dme : 9.03	EE

Figure I.3 : Exemple de résultats du programme JET (SOGREAH)

Les caractéristiques du panache sont calculées à chaque pas de la trajectoire jusqu'à la surface ou la profondeur d'équilibre. Le panache est bloqué à une profondeur d'équilibre lorsque sa densité a atteint la densité du milieu récepteur à la côte correspondante, ou bien lorsque la vitesse verticale du panache devient très faible et insuffisante pour permettre au panache de remonter jusqu'à la surface.

## I.2 -TRANSITION ENTRE LE JET OU PANACHE ET L'ECOULEMENT GENERAL

Lorsque le jet a atteint la surface ou sa côte d'équilibre, son écoulement perd progressivement de ses caractéristiques. Sa vitesse et les forces de flottabilité s'annulent peu à peu. Les eaux de l'effluent qui se sont mélangées s'étalent alors horizontalement.

Les modèles du type précédent ne sont plus aptes à reproduire cette transition entre les deux écoulements (vertical et horizontal). L'IFREMER a demandé à la SOGREAH de traiter ce problème et d'effectuer un calcul approché afin de déterminer les caractéristiques de cette transition.

En effet, le modèle JET donne le débit, le diamètre et la profondeur du panache, mais les dimensions de la zone d'impact réel du rejet sont inconnues. Le "champ proche" correspond à la zone d'étalement, lorsque le panache n'a pas encore tout à fait perdu ses caractéristiques dynamiques propres (existence de vitesses radiales). Or par souci de simplification, les modèles de convection-diffusion ne considèrent pas le panache mais plutôt le "nuage" créé par l'effluent mélangé et qui est transporté passivement dans le milieu par les courants moyens. On a donc besoin pour ce "champ proche" des conditions aux limites sous la forme de flux injectés de contamination, variables en fonction de la profondeur et de l'espace horizontal si l'étalement est important.

Pour évaluer les dimensions de cette zone de transition, il est nécessaire de se donner un critère permettant de dire quand la vitesse résiduelle d'étalement est négligeable devant le courant moyen. Ce critère ne pouvant être que subjectif, on prendra ici une vitesse résiduelle inférieure à 3 cm/s.

### I.2.1 Etalement par continuité

La SOGREAH (1989) a adapté le programme JET pour ajouter le calcul de l'étalement. La transition revêt différents aspects selon les cas (*figure I.5*) :

- \* le jet atteint la surface libre. Si le courant moyen est faible, il s'étale circulairement. Sinon il atteint la surface asymptotiquement et est soumis directement à l'influence du courant.
- \* le jet est bloqué en profondeur et se termine par un effet de dôme. L'effluent s'étale à la côte d'équilibre. S'il existe un courant, la côte d'équilibre est atteinte asymptotiquement avec ou sans oscillations.

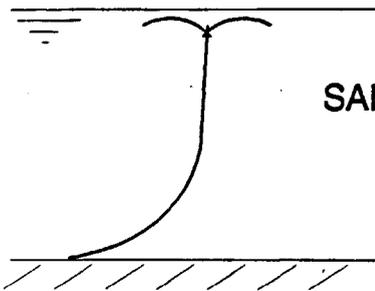
La SOGREAH utilise des lois classiques de l'hydraulique associées à des hypothèses simplificatrices nécessaires pour faciliter ce calcul par ailleurs très complexe :

- Etalement sur une épaisseur  $E_p$  calculée initialement à partir du débit, du rayon et de la vitesse moyenne du panache (comprenant cette fois 95% de l'effluent).
- En surface, il peut arriver que le panache atteigne une vitesse critique, au-delà de laquelle il se produit un "ressaut" avec un retour au régime fluvial et une variation rapide de la vitesse et de l'épaisseur (*figure I.5*). Dans ce cas, la couche d'étalement est caractérisée par une épaisseur et une vitesse radiale correspondant à la section critique d'écoulement.
- Si le panache est bloqué à une côte intermédiaire, la hauteur totale de développement du jet (sous forme de dôme) est calculée en raisonnant sur la conservation de la quantité de mouvement et de la flottabilité.

Figure I.5

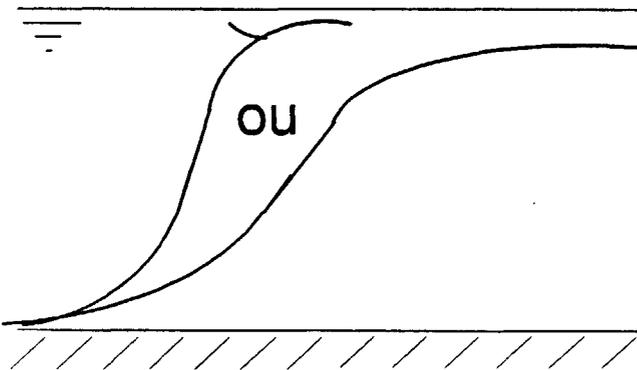
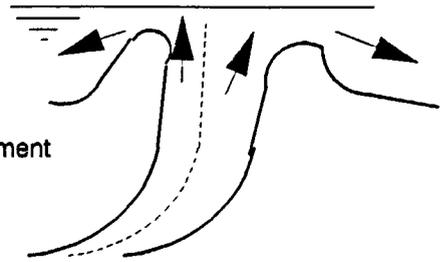
**COMPOTEMENT DU PANACHE  
DANS DIFFERENTS CAS DE STRATIFICATION ET DE COURANT**

**MILIEU HOMOGENE**



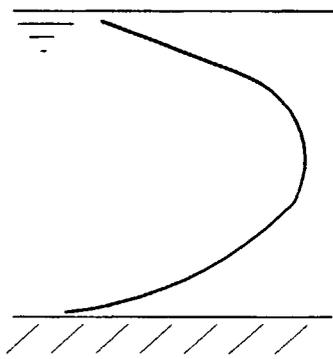
SANS COURANT

section critique d'écoulement



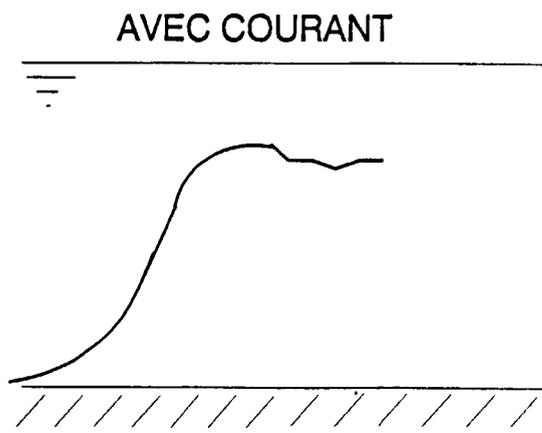
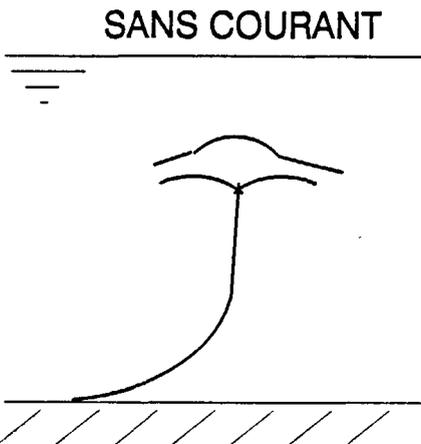
OU

AVEC COURANT PORTANT



AVEC COURANT CONTRE

**MILIEU STRATIFIE EN DENSITE**



- La perte d'énergie lorsqu'on s'éloigne du centre du panache au fur et à mesure de l'étalement est calculée en prenant en compte le frottement à l'interface si le jet arrive en surface ou aux deux interfaces supérieures et inférieures s'il est bloqué en profondeur.

La vitesse radiale décroît en fonction de la distance au centre. Le calcul est stoppé lorsqu'elle est inférieure à 3 cm/s. La distance atteinte donne le rayon de la zone d'impact dynamique dit également "champ proche" du rejet.

### I.2.2 Etalement densimétrique

Le calcul de cet étalement radial par continuité ne tient pas compte de l'étalement densimétrique qui peut survenir lorsque les courants sont peu dynamiques et lorsque la flottabilité résiduelle en surface est suffisante.

D'après la SOGREA (1982), on peut calculer approximativement la vitesse et l'épaisseur de la couche d'étalement résultante par les formules suivantes :

$$E_{pd} = 0.071 \cdot Q^{1/2} \cdot (r \cdot d\rho / \rho)^{1/4}$$

$$v_e = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot E_{pd}}$$

avec

$E_{pd}$	=	épaisseur de la couche
$Q$	=	débit du panache en surface
$r$	=	distance au centre du panache
$\rho$	=	masse volumique de l'effluent
$d\rho$	=	différence de densité en surface
$v_e$	=	vitesse horizontale radiale

Lorsque les courants sont très faibles, la dilution en surface (par exemple à Toulon Est, pour un rejet de profondeur égale à 43 mètres) est de l'ordre de 25 à 30 pour un débit fort (0,8 m<sup>3</sup>/s) en sortie d'émissaire et de 50 pour un débit moyen (0,20 m<sup>3</sup>/s). L'écart résiduel de densité peut atteindre des valeurs relativement importantes (0,0006). L'épaisseur de la tâche est de l'ordre de 0,5 à 1,5 mètre. Dans un rayon de 10 mètres autour du centre, la vitesse radiale pourrait atteindre 20 cm/s (débit moyen) et 30 cm/s (débit fort). A 100 mètres du centre, elle n'est plus que de quelques cm/s (4 à 6 cm/s) sur une épaisseur de 0,5 à 1m environ, ce qui n'est pas négligeable.

### I.2.3 Calcul des flux

Les flux de contamination introduits par le rejet dans le champ proche de l'émission dépendent du flux vertical dû au panache de remontée et de sa répartition spatiale après l'étalement horizontal.

Selon la grille spatiale choisie pour la discrétisation du modèle de transport et mélange horizontal, la répartition des flux va être concentré dans une ou plusieurs mailles du modèle.

Avant l'étalement du panache, la répartition du flux autour de l'axe de remontée est gaussienne. Si le diamètre du panache est du même ordre de grandeur que la discrétisation horizontale du modèle, le flux est concentré dans une seule maille, et il est égal au flux sortant de l'émissaire, réparti sur l'épaisseur totale de la couche d'étalement.

Pendant l'étalement, les flux radiaux plus ou moins forts selon les directions, autour de l'axe du panache, induisent une répartition du flux dans un rayon de 10 à 50 mètres avec un pourcentage plus ou moins fort au centre et dans les mailles adjacentes.

La discrétisation spatiale du modèle horizontal étant ici égale à 20 mètres, nous verrons que la répartition initiale des flux est gommée par la diffusion autant physique que numérique, l'échelle du phénomène étant du même ordre de grandeur que la maille du modèle. Les résultats montrent que les dilutions dans le "champ lointain" au delà de 100 ou 200 mètres du rejet dépendent peu de la répartition dans le "champ proche", à moins que la présence d'un diffuseur de grande envergure détermine une tâche initiale très étalée au départ avec des dilutions importantes.

Le calcul simplifié des flux qui avait été tenté initialement dans cette étude n'a donc pas été utilisé et n'est pas présenté ici.

### **I.3 - MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE DANS LA ZONE D'ETUDE**

**La zone d'étude est définie comme étant la zone de dilution où les concentrations d'une majorité de paramètres issus du rejet sont détectables ou dépassent le bruit de fond et où les processus déterminants peuvent se produire.**

On néglige l'injection d'eau introduite par le panache et son effet dynamique qui induit en réalité une courantologie locale parfois importante dans une zone allant jusqu'à 50 mètres de rayon. On considère le rejet seulement comme un flux de contamination exprimé en mg/s. Ce flux est introduit dans un volume d'eau qui est lui-même animé par un courant.

Le modèle reproduit ensuite le transport par les courants et le mélange par diffusion et dispersion du nuage de contamination

#### **I.3.1 Choix du modèle**

En Méditerranée, les courants sont faibles mais très variables en fonction des conditions météorologiques. Le vent entraîne les couches de surface par frottement et le mouvement se propage en profondeur par viscosité et turbulence. On devrait donc observer des courants généralement décroissant de la surface au fond et tournant sous l'effet de la force de Coriolis. En zone littorale, la remontée des fonds et la présence de baies induisent une courantologie locale avec formation de tourbillons horizontaux d'échelle moyenne. Le vent poussant les eaux de surface vers la côte provoque un courant de retour au fond, ou au contraire un upwelling (remontée des eaux du fond) lorsqu'il pousse celles de surface vers le large.

La bande littorale constitue une couche limite entre la côte et les eaux du large ; elle obéit à une suite de processus complexes et très variables.

La modélisation de tels processus en zone littorale reste dans le domaine de la recherche scientifique. Un des principaux obstacles à une telle modélisation en méditerranée est encore de connaître les conditions aux limites, lorsque celles-ci sont ouvertes au large. Une autre difficulté vient du fait de la forte variabilité des courants dans les trois dimensions.

Dans le cadre de ce programme, il n'était pas possible de développer un modèle de courants dans des conditions aussi complexes.

La réalisation de campagnes de mesures par marquage de l'effluent et suivi autour du rejet nous a montré que la zone d'étude définie selon les critères précédents s'étendait sur un rayon moyen de 700 à 1000 mètres. Nous avons considéré en première approximation que, en dessous de cette échelle moyenne, le courant à chaque profondeur était uniforme horizontalement. La visualisation par un marqueur du trajet de l'effluent au cours de son transport nous a montré en général une direction relativement uniforme et constante prise par la tache. A l'échelle de la zone d'étude, l'évolution temporelle du courant en surface semble plus importante que son évolution spatiale.

Par contre, lorsque le panache est bloqué en profondeur et qu'il se répartit sur une couche d'épaisseur importante, le marquage du nuage nous a montré qu'il se séparait en plusieurs

taches s'étalant à différentes profondeurs dans des directions parfois variables. Ce phénomène de cisaillement nous a donc paru intéressant à étudier afin de prendre en compte les directions de transport privilégiées, différentes suivant la côte de blocage du panache et sa répartition sur la profondeur. D'autre part si les phénomènes de chute de particules entraînent des variations significatives des concentrations dans les différentes couches, il paraît important de connaître précisément le transport dans les couches sous-jacentes.

Nous avons donc utilisé un code de calcul numérique existant (SALOMON 1980), qui résout l'équation de transport et mélange sur l'espace horizontal. Nous l'avons appliqué sur plusieurs couches superposées, animées chacune par un courant uniforme différent et qui interagissent entre elles à travers des flux verticaux de transport et diffusion.

### I.3.2 Présentation du modèle

L'équation d'advection-diffusion est intégrée sur chaque couche horizontale, dont l'épaisseur ( $dz$ ) est variable selon les couches ; elle s'écrit :

$$dc/dt + d\Phi_x/dx + d\Phi_y/dy - (\Phi_z(l_1) - \Phi_z(l_2)) = 0.$$

$c$  : concentration moyenne sur l'épaisseur d'un paramètre conservatif

$\Phi_x$  : flux horizontal selon la direction Ouest-Est

$\Phi_y$  : flux horizontal selon la direction Sud-Nord

$$\begin{aligned} \Phi_x &= u.c - K_h . dc/dx \\ \Phi_y &= v.c - K_h . dc/dy \\ &\quad \text{TRANSPORT} \quad \text{DIFFUSION} \end{aligned}$$

$\Phi_z$  : flux vertical à travers les limites entre les couches

$l_1$  : limite supérieure de la couche

$l_2$  : limite inférieure de la couche

$$\begin{aligned} \Phi_z &= w.c - K_z . dc/dz \\ &\quad \text{TRANSPORT} \quad \text{DIFFUSION} \end{aligned}$$

$u, v, w$  : composantes du courant selon les axes de coordonnées (axe vertical dirigé du fond vers la surface).

On néglige le courant vertical mais la vitesse  $w$  peut correspondre à la vitesse de chute des particules, toujours négative dans ce système.

$K_h$  et  $K_z$  : coefficients de dispersion horizontal et vertical

### A. EXPRESSION DES FLUX HORIZONTAUX

Les flux horizontaux sont résolus selon le code de calcul développé par SALOMON (1980), en particulier le schéma permettant d'exprimer les dérivés spatiales. Le schéma temporel est explicite, à deux pas, du type prédicteur-correcteur de KURIHARA (1965). Il a la propriété de ne pas engendrer trop de diffusion numérique (précision du second ordre) (ROACHE 1982).

Dans notre cas, les gradients horizontaux de concentration sont très importants autour de l'émergence du panache, mais l'échelle spatiale de ce "champ proche" est petite par rapport à la zone d'investigation (10 - 50 mètres / 500 - 1000 mètres).

Le code utilisé a été testé et validé avec des pas d'espace  $dx$  et  $dy$  constants. Pour éviter des tableaux trop grands de valeurs, nous sommes obligé de choisir un pas moyen égal à 20 mètres qui est de l'ordre de grandeur du nuage initial. En ne prenant pas en compte la perturbation courantologique de petite échelle due au panache, il est logique de ne pas tenter de reproduire avec précision les gradients dans la zone proche du rejet; mais à cause de cette échelle, les résultats dans cette zone sont entachés d'une forte diffusion numérique.

## B. EXPRESSION DES FLUX VERTICAUX ENTRE LES COUCHES

Le flux vertical aux limites supérieures et inférieures de chaque couche est plus délicat à évaluer. En effet, l'épaisseur des couches est variable pour permettre une plus grande précision dans les zones de gradient mais cela introduit des effets numériques parasites.

D'autre part, pour connaître le flux de transport et de diffusion, il faudrait pouvoir atteindre les valeurs locales aux limites de la couche ; or, seules les valeurs moyennes résultant de l'intégration sur l'épaisseur de chaque couche sont accessibles.

Après plusieurs tests, un schéma numérique simple a été choisi pour évaluer ces flux verticaux d'advection et diffusion entre les couches (annexe 2).

Le calcul du flux d'advection verticale induit une diffusion numérique, qui entraîne des incertitudes sur les fronts raides de concentration, comme dans le cas des flux horizontaux. Mais, si sur l'horizontale, la diffusion pouvait entraîner un étalement de la tache plus important au départ, les courants étant supposés uniformes, les résultats sur l'ensemble du domaine n'y sont pas très sensibles. Par contre, dans le plan vertical, les courants tournent et décroissent en fonction de la profondeur, et une petite variation de concentration due à un effet numérique peut introduire un biais non négligeable sur les résultats.

Dans le cas de paramètres dissous, la vitesse verticale est nulle. Le flux vertical ne dépend que de la diffusion, elle-même fonction d'un paramètre empirique.

Dans le cas de paramètres particuliers, les vitesses de chute de la matière organique des rejets urbains semblent faibles, notamment vis à vis de la vitesse de diffusion. Les effets numériques introduits par ces flux d'advection seront donc supposés négligeables vis à vis de l'incertitude sur le coefficient de diffusion verticale et sur la vitesse de chute elle-même.

## CHOIX DU PAS VERTICAL $DZ$

Quelques essais ont été réalisés dans le cas d'un nuage d'épaisseur égale à 4 mètres, transporté en surface par un courant constant sur la profondeur.

Trois discrétisations verticales ont été testées (*figure I.6*) :

- La première discrétisation testée est la plus grossière : l'épaisseur des couches est constante, et égale à 4 mètres.
- La seconde est plus détaillée dans la couche polluée et au dessous : l'épaisseur des couches est constante, égale à 2 mètres sur 8 mètres de profondeur, puis égale à 4 mètres au dessous.
- La troisième discrétisation est raffinée dans la couche sous-jacente au nuage. (2 couches de 2 mètres dans le nuage; 4 couches de 1 mètre au dessous, puis  $dz=4$  mètres).

Les résultats (*figure I.6*) montrent des différences dans les profils de concentrations, notamment à la limite inférieure de la tache dans la zone proche du panache. Les discrétisations détaillées donnent bien sûr un gradient mieux défini. La discrétisation la plus grossière reproduit bien la diffusion des concentrations dans le cas d'un coefficient de diffusion verticale fort, mais lorsque celui-ci est plus faible, des différences plus importantes sont observées.

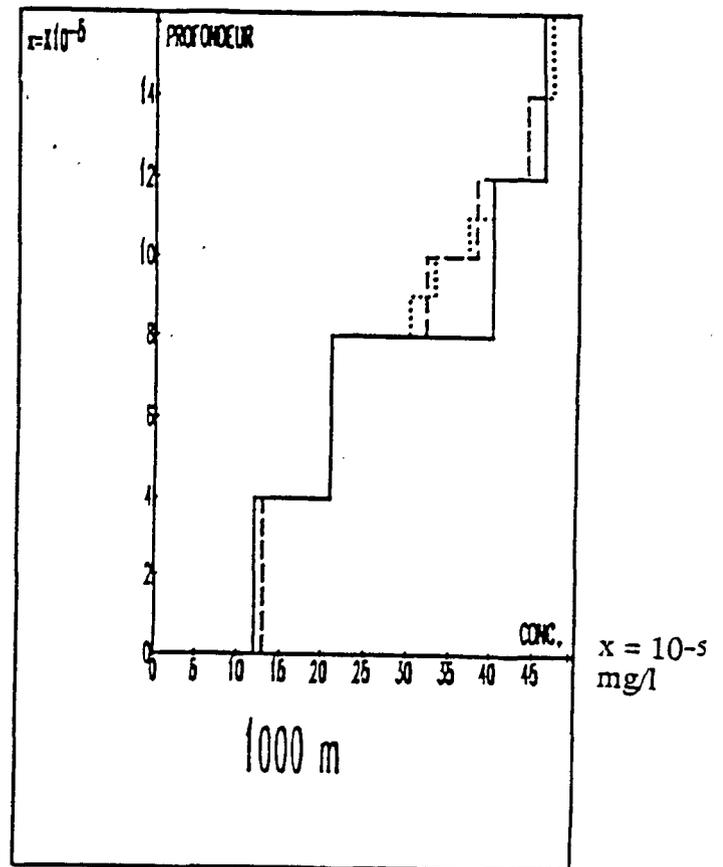
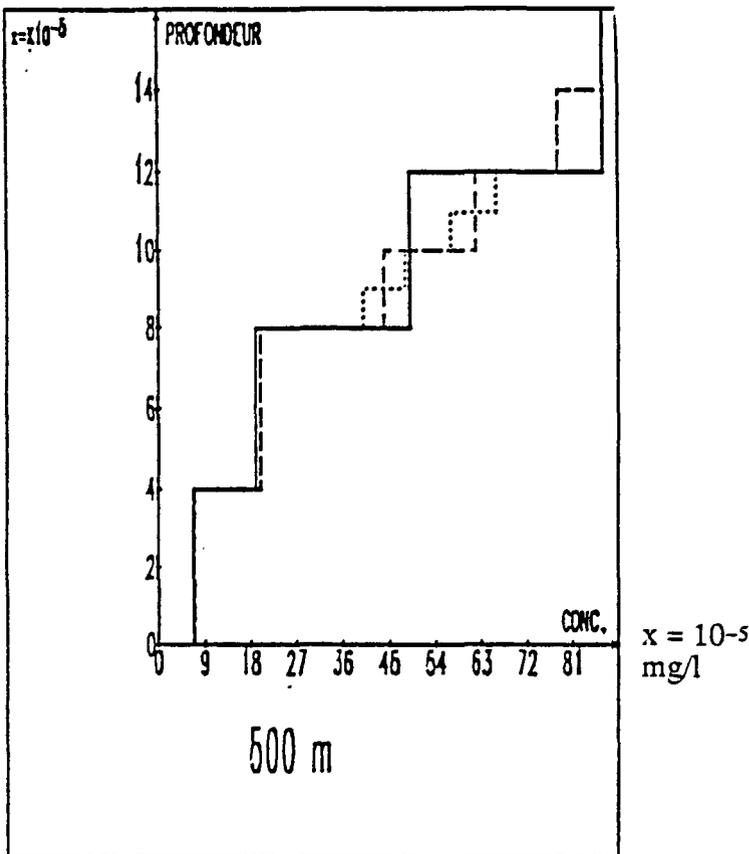
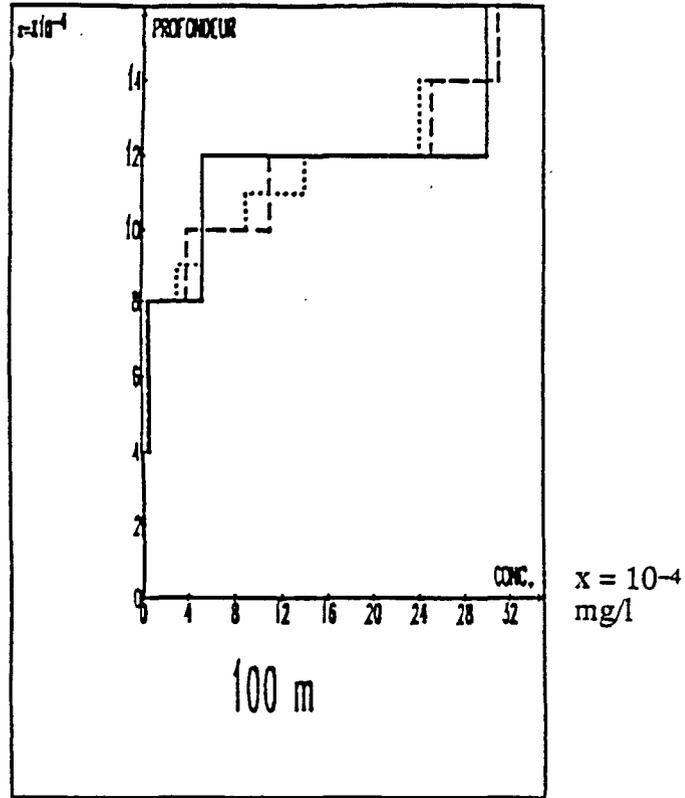


Figure I.6 : Profil vertical de concentrations pour trois discrétisations verticales du modèle à 100 m, 500 m et 1000 m de distance du rejet, au bout de 4 heures (courant horizontal constant sur la profondeur = 10 cm/s)

## CHAPITRE II

### ANALYSE DE SENSIBILITE DU PROGRAMME JET A DIFFERENTES CONDITIONS DU REJET ET DU MILIEU RECEPTEUR

#### INTRODUCTION

Le programme JET est utilisé dans différentes conditions afin de tester la variabilité des résultats en termes de position, diamètre, épaisseur et dilution du panache de remontée à sa côte d'équilibre.

Cette analyse de sensibilité ne concerne que des rejets de ville moyenne, dont les débits moyens sont de l'ordre de  $700 \text{ m}^3/\text{h}$ , introduits en mer par un émissaire sans diffuseur, par 44 mètres de profondeur. En effet, les caractéristiques du rejet testé correspondent à celles du rejet de TOULON -EST (rejet de Ste MARGUERITE) ; les conditions testées recouvrent globalement les situations rencontrées dans la rade de TOULON.

Le but de cette analyse est double : d'une part appliquer le modèle JET pour démontrer les possibilités offertes par son utilisation, d'autre part indiquer les paramètres majeurs qui influent sur le comportement du panache, ainsi que sa variabilité en fonction des conditions du milieu.

L'émissaire de Toulon est composé de deux orifices jumelés de 400 mm de diamètre. Les calculs sont réalisés en prenant un émissaire ayant un diamètre équivalent égal à 570 mm, qui correspond à un orifice de même section totale que les deux tuyaux réunis.

Le jet est horizontal ( $\Theta_0 = 0$ ).

Le nombre de FROUDE densimétrique calculé par la fonction :

$$Fr = \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot d_0 \cdot (\rho_a - \rho_1 / \rho_1)}}$$

est compris entre 1 et 8 pour ce rejet. La coordonnée réduite  $n = Y / Fr / d_0$  des abaques de la SOGREA est toujours supérieure ou égale à 10 en surface. On est donc placé sur la branche asymptotique de la courbe donnant la dilution, cas le plus fréquemment rencontré dans les problèmes d'assainissement en mer.

#### CONDITIONS TESTEES

Le milieu récepteur est pris soit homogène, soit stratifié. Le profil de densité est défini par :

- la densité au fond  $\sigma_f$ ,
- les profondeurs inférieures ( $h_{inf}$  ou  $z_{inf}$ ) et supérieures ( $h_{sup}$  ou  $z_{sup}$ ) de la pycnocline,
- et la différence de densité  $\delta\sigma$  entre ces deux profondeurs.

La *figure II.1* décrit ces caractéristiques.

- . Dans les premiers essais, la densité au fond  $\sigma_f$  est prise constante, égale à 28.
- . La stratification de densité  $\delta\sigma$  varie de 0,2 à 2,4.
- . Les profondeurs inférieures  $z_{inf}$ , définissant le bas de la pycnocline, sont égales à 45 mètres (fond), 35, 25, 15 et 5 mètres.
- . Les profondeurs supérieures  $z_{sup}$ , définissant le haut de la pycnocline, varient de 5 en 5 mètres, de la surface (0 m) jusqu'à 5 mètres au-dessus de la profondeur inférieure.

Le milieu est soumis à des vitesses variables sur la profondeur en intensité et direction :

. La vitesse en surface  $V_0$  est comprise entre 4 et 30 cm/s (*figure II.2*). Le courant décroît selon une loi exponentielle du type :

$$U(z) = V_0 \cdot e^{-\alpha z}$$

$$\alpha = - \frac{1}{z_p} \ln \left( \frac{0.02}{V_0} \right)$$

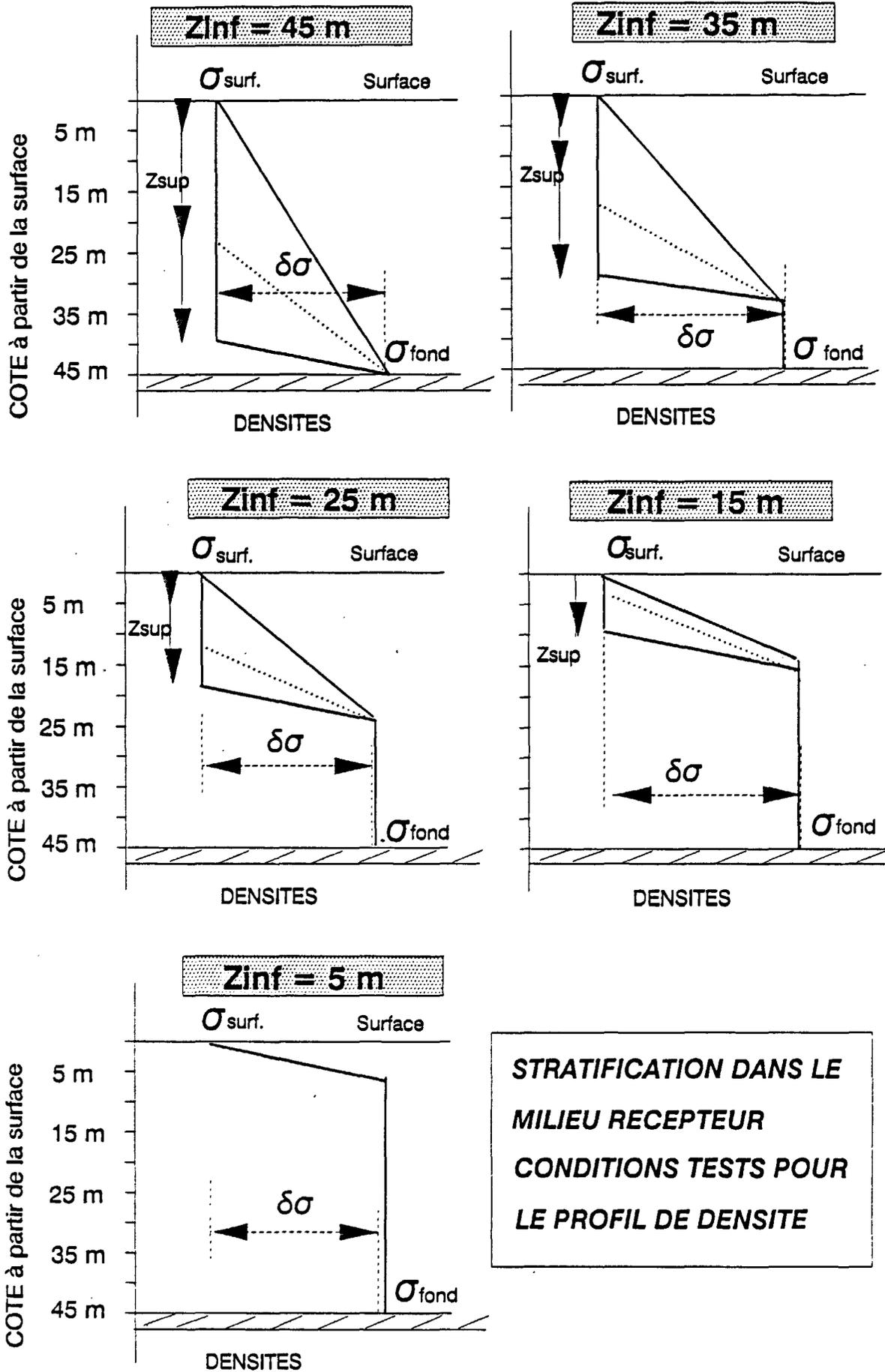
avec  $U(z)$  : intensité du courant en fonction de la profondeur  
 $V_0$  : intensité du courant en surface ( $z=0$ )  
 $z_p$  : profondeur d'influence du courant ou épaisseur de la couche courant  
 pour  $z > z_p$  :  $U(z)=0.02$  m/s (valeur minimale du courant)

. Le courant peut tourner en fonction de la profondeur. Dans la nature, cette rotation n'est sans doute pas régulière. Pour les essais, nous nous sommes donnés un angle de rotation régulier et positif (rotation dans le sens trigonométrique) de la surface jusqu'au fond. L'angle  $\beta_0$  par rapport à la direction de l'émissaire est donné en surface, il s'accroît tous les deux mètres d'un angle  $d\beta$  égal à 0, 5, 10 ou 15 degrés. (*figure II.3*)

Le débit et la densité de l'effluent correspondent aux situations moyennes rencontrées :

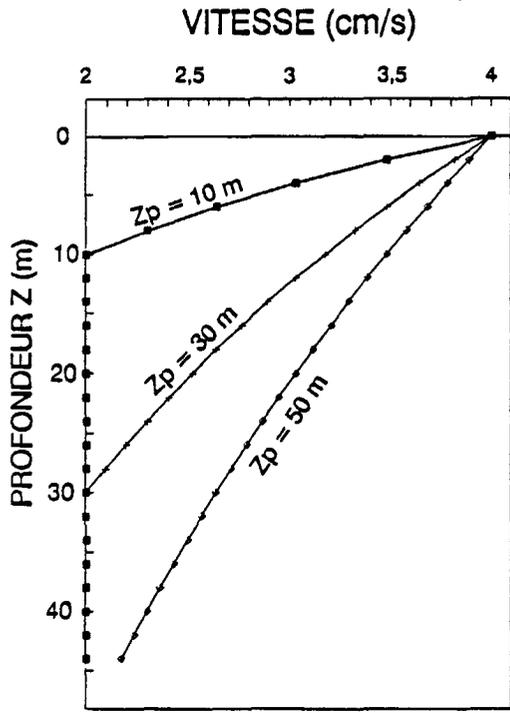
débit = 0.17 ou 0.20 m<sup>3</sup>/s = 600 ou 700 m<sup>3</sup>/h  
 densité = 0.9990 (température = 16°C)

Pendant l'année, le débit moyen journalier varie entre 350 et 2700 m<sup>3</sup>/h, 90% des débits étant compris entre 500 et 750 m<sup>3</sup>/h. La densité diminue en été jusqu'à 0,9970 lorsque la température atteint 25°C, elle est égale à 0,9995 en hiver (température = 12°C).

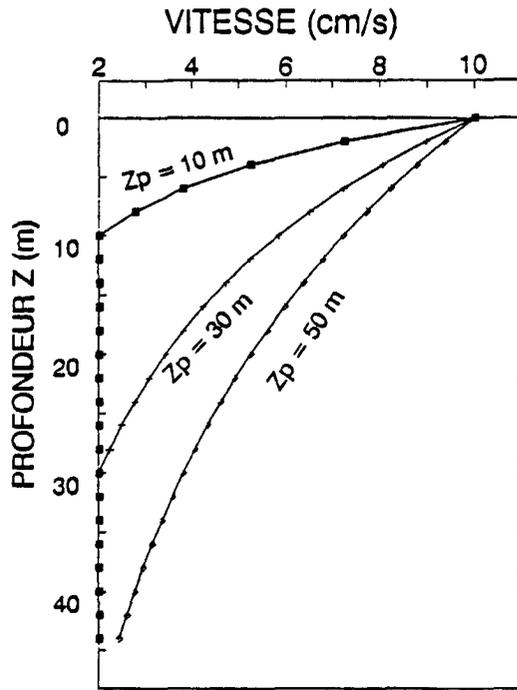


**STRATIFICATION DANS LE MILIEU RECEPTEUR  
CONDITIONS TESTS POUR LE PROFIL DE DENSITE**

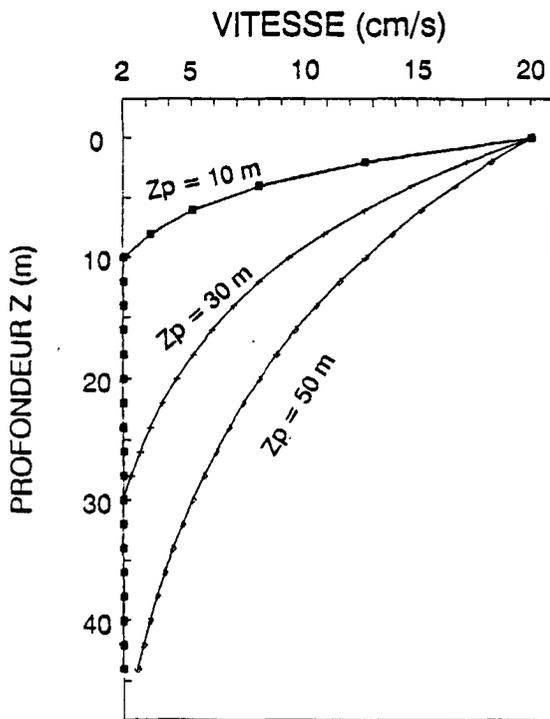
**COURANTS DANS LE MILIEU RECEPTEUR**  
**CONDITIONS TESTS POUR LES INTENSITES DU COURANT**



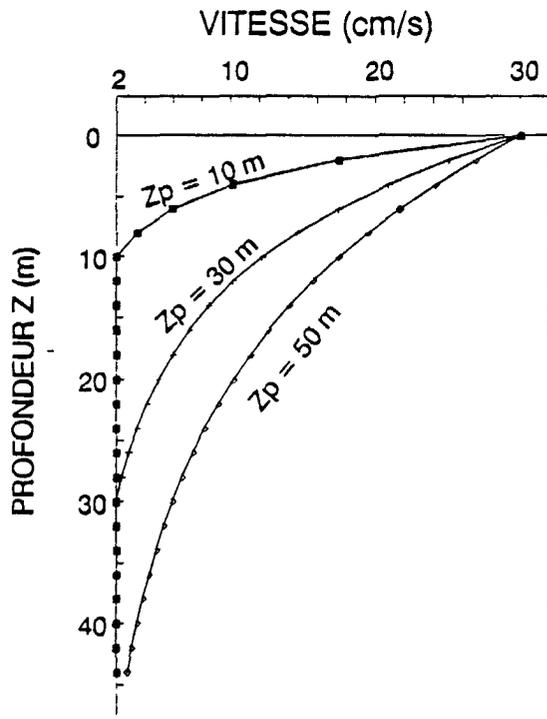
**VITESSE EN SURFACE = 4 cm/s**



**VITESSE EN SURFACE = 10 cm/s**



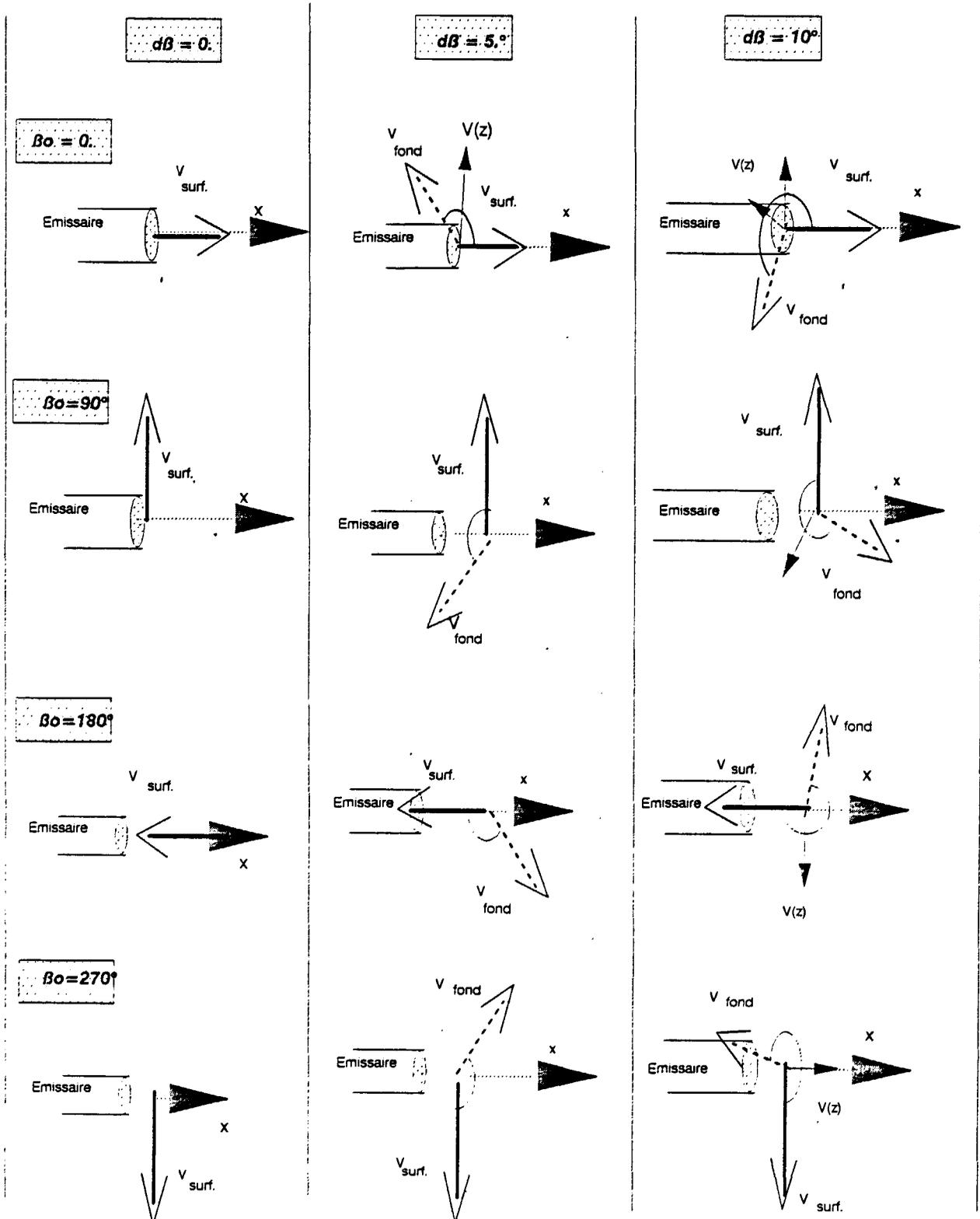
**VITESSE EN SURFACE = 20 cm/s**



**VITESSE EN SURFACE = 30 cm/s**

FIGURE II.3

**COURANTS DANS LE MILIEU RECEPTEUR**  
**CONDITIONS TESTS POUR LA ROTATION DU COURANT**



## RESULTATS

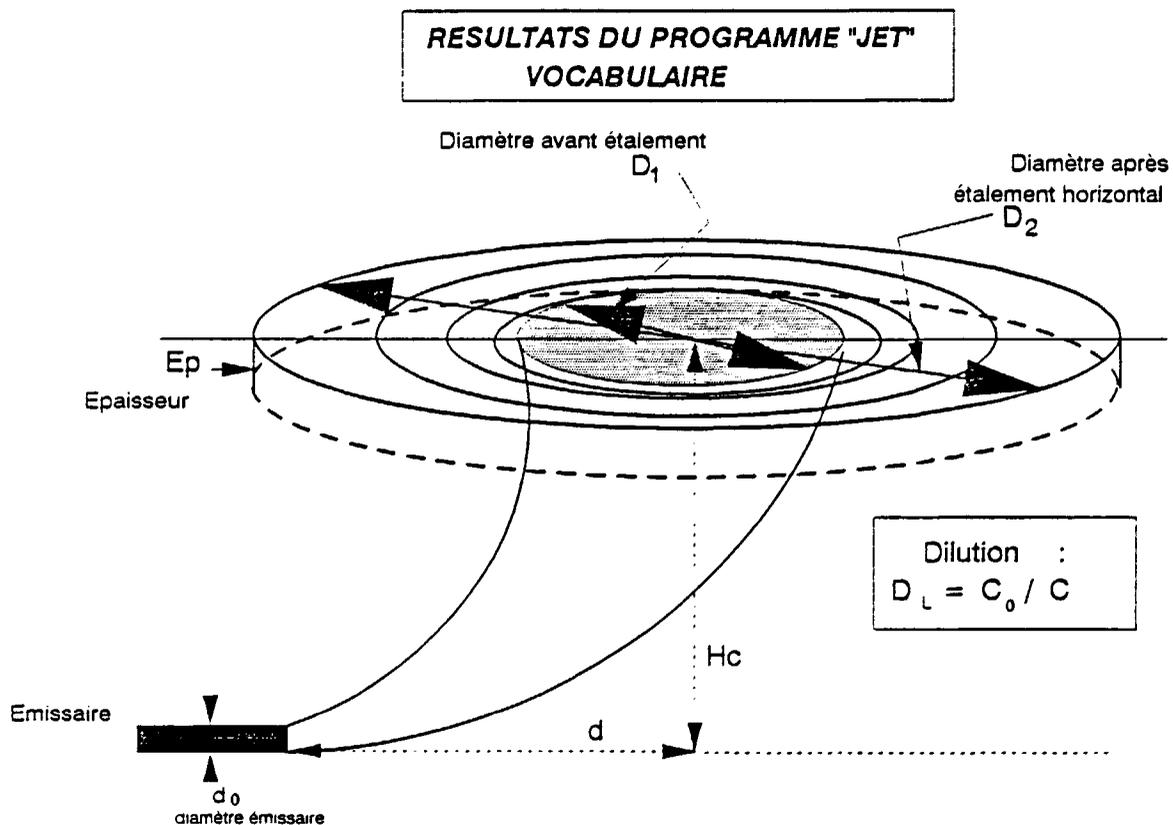
Le panache est caractérisé par sa position par rapport à la sortie de l'émissaire ( $x, y$  ou  $d$ ), sa profondeur d'étalement  $z_c$ , son diamètre ( $D_1$  ou  $D_2$ ), son épaisseur ( $E_p$ ) et enfin sa dilution ( $D_L$ ). La *figure II.4* décrit ces résultats et définit le vocabulaire qui sera utilisé dans cette étude.

Les résultats sont analysés en observant l'influence des conditions du milieu sur leur variabilité. Les deux cas de milieu homogène et stratifié seront analysés séparément. On spécifiera pour chaque résultat l'influence des conditions du milieu à travers les trois éléments suivants :

- . la forme de la pycnocline déterminée par  $h_{inf}$  et  $h_{sup}$  comptés à partir du fond (ou  $z_{inf}$  et  $z_{sup}$  comptés à partir de la surface) et par l'épaisseur  $e = h_{inf} - h_{sup}$
- . la stratification de densité  $\delta\sigma$
- . les courants (vitesses déterminées par  $V_0$  et  $z_p$  et directions caractérisées par  $\beta_0$  et  $d\beta$ )

Rappelons que le captage en profondeur de l'effluent peut être la conséquence de deux phénomènes différents. Dans un cas, la vitesse verticale du panache de remontée devient très faible et l'effluent s'étale horizontalement sans atteindre la surface. Dans l'autre cas, le panache est bloqué par manque de forces de flottabilité car sa densité s'égalise avec celle du milieu ambiant. Les caractéristiques du panache, calculées par le programme JET, sont différentes dans ces deux cas.

Figure II.4



## II.1 DISTANCE AU REJET $d$

La distance horizontale " $d$ " du centre du panache au droit de la sortie de l'émissaire est toujours inférieure à 20 mètres dans les conditions testées (profondeur 44 mètres). Elle est d'autant plus grande que le courant est fort sur une couche d'eau importante et dans la mesure où le courant va dans le même sens que le jet, c'est-à-dire dans l'axe de l'émissaire.

Seul un débit fort ou un courant important jusqu'au fond peut entraîner une augmentation importante de cette distance (jusqu'à 30-40 mètres). Etant donné sa faible variabilité et son ordre de grandeur très inférieur à la zone étudiée, nous ne nous intéresserons pas à ce paramètre; nous assimilons le centre du panache à la sortie de l'émissaire.

## II.2 PROFONDEUR DE CAPTAGE ( $h_c$ ou $z_c$ )

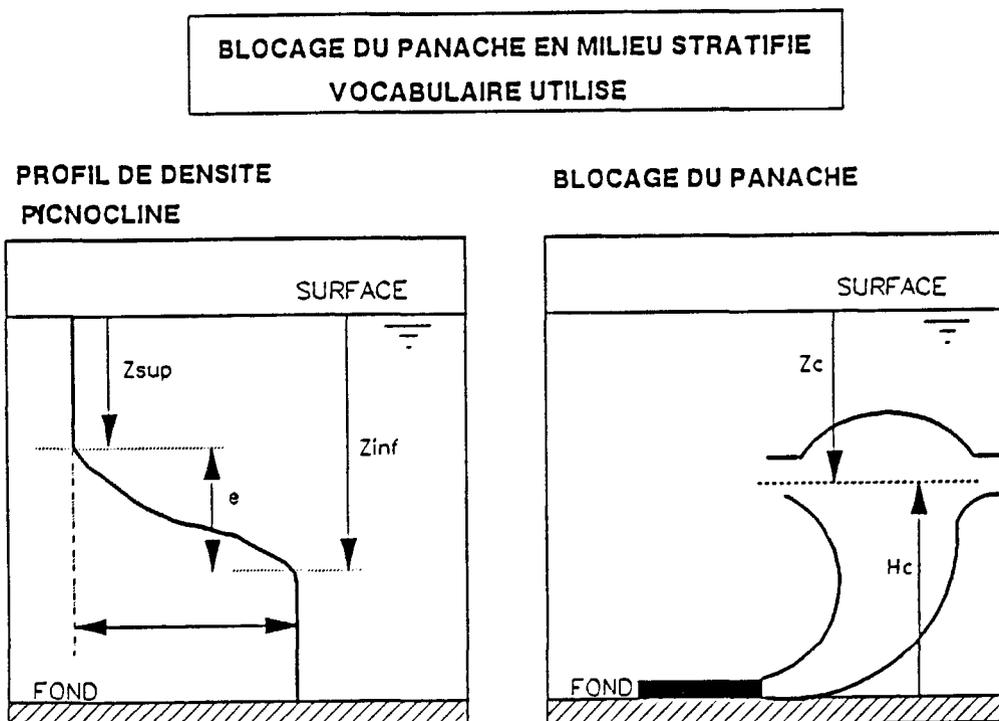
### A. MILIEU HOMOGENE

Le panache atteint toujours la surface libre ( $h_c=44,5$  mètres), excepté lorsque le courant est fort sur une grande profondeur d'eau ( $V_0=30$  cm/s et  $z_p=50$  m).

### B. MILIEU STRATIFIE

Selon les conditions du milieu, le panache atteint la surface libre ou est capté en profondeur. Cette profondeur  $Z_c$  varie notamment avec la stratification ( $\delta\sigma$ ) et la forme de la pycnocline définie par  $Z_{sup}$  et  $Z_{inf}$  (figure II.5).

Figure II.5



### \* INFLUENCE DE LA FORME DE LA PYCNOCLINE

Pour une forme de pycnocline donnée, le panache capté est toujours bloqué au dessus du bord inférieur de la thermocline ( $z_c < z_{inf}$ ).

D'autre part, plus l'épaisseur  $e$  de la pycnocline est faible, plus la profondeur de captage  $z_c$  est grande; une diminution de 5 mètres de l'épaisseur de la pycnocline entraîne l'approfondissement de la côte de blocage d'environ 1 à 2 mètres.

Dans certaines conditions de courants et de stratification, et lorsque la pycnocline débute en profondeur ( $z_{inf} \geq 35m$ ), il existe une épaisseur limite minimum de la pycnocline, au-dessous de laquelle, le panache remonte plus haut ou complètement à la surface. Cette épaisseur minimum  $e_{lim}$  est variable en fonction du profil de courant et de  $\delta\sigma$ .

Le panache n'est jamais bloqué plus bas que 10 mètres au dessus du fond (c'est-à-dire pas au delà de 35 mètres de profondeur). Si la pycnocline est située en-dessous de 35 mètres de profondeur, le panache atteint la surface quels que soient la stratification  $\delta\sigma$  et les courants.

### \* INFLUENCE DE LA STRATIFICATION DE DENSITE $\delta\sigma$

La *figure II.6* montre l'évolution de  $h_c$  (comptée à partir du fond) en fonction de  $\delta\sigma$ , pour différentes valeurs de  $z_{inf}$ . Dans chaque graphe correspondant à une valeur de  $z_{inf}$ , plusieurs courbes sont représentées, chacune correspondant à un profil de courant test différent (en intensité et direction) et une épaisseur de pycnocline particulière (différents  $z_{sup}$ ).

Pour une situation donnée de courants et de forme de la pycnocline, il existe une stratification limite  $\delta\sigma_{lim}$  au-delà de laquelle le panache n'arrive plus en surface. La profondeur  $z_c$  augmente alors brutalement (sur les graphes,  $h_c$  diminue) puis plus régulièrement au fur et à mesure que  $\delta\sigma$  augmente. ( $dz_c = 1,5m$  pour  $d\delta\sigma = 1$ ).  $\delta\sigma_{lim}$  dépend des profondeurs de la thermocline et des courants.

Le schéma de la *figure II.7* donne, en fonction des paramètres  $z_{sup}$  et  $z_{inf}$  définissant la forme de la pycnocline, la valeur minimale de  $\delta\sigma$  à partir de laquelle le panache risque d'être capté dans certaines conditions de courants.

Lorsque la thermocline est située dans la couche de surface ( $z_{inf} < 30 m$ ), le panache peut être capté dans certains cas à partir d'une très faible stratification (0,4). Si le gradient débute au fond ( $z_{inf} \geq 35m$ ), la limite est plus haute.

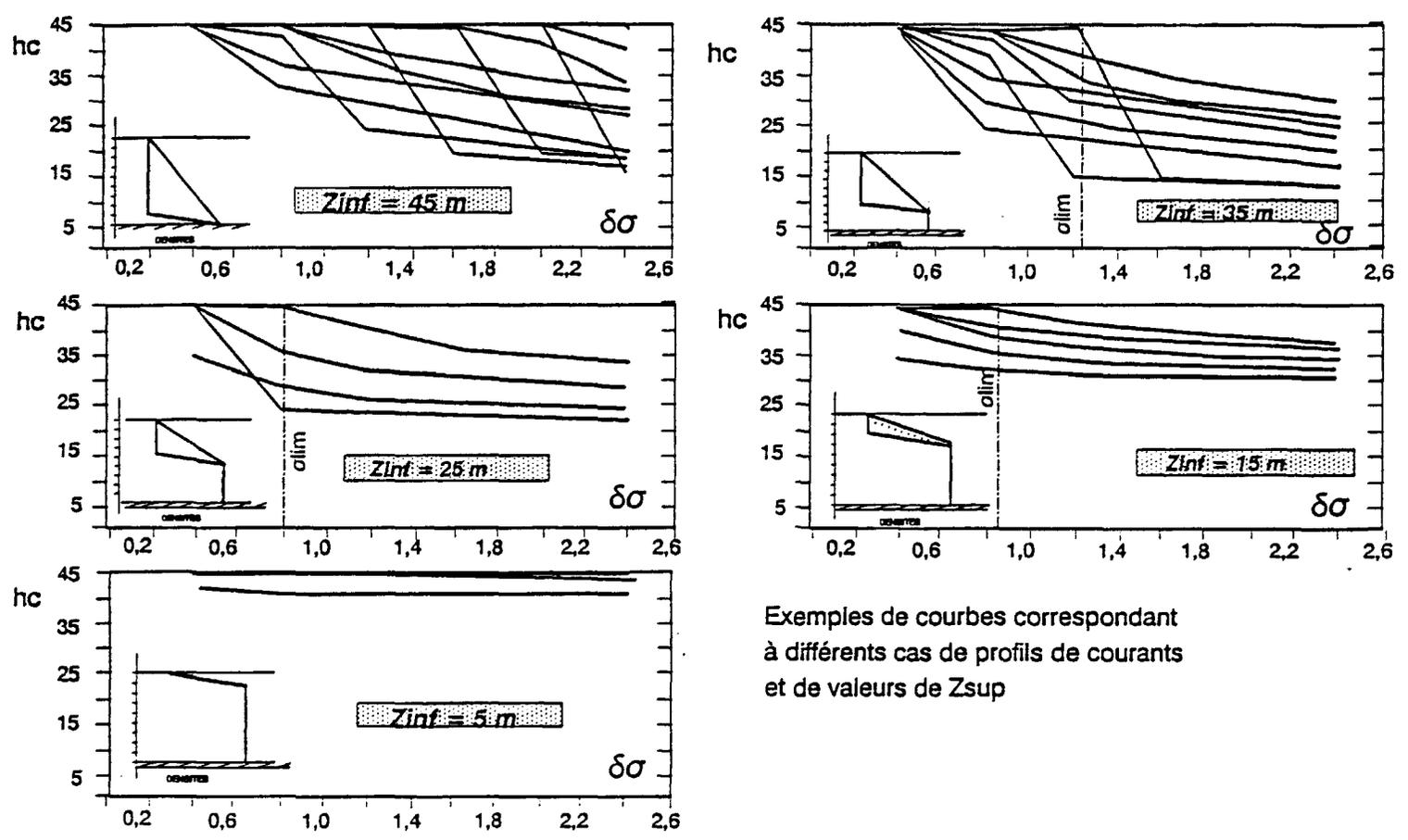
Cette augmentation de  $\delta\sigma_{lim}$  s'explique par le fait que plus la pycnocline est proche de la surface, plus le panache qui la rencontre en fin de remontée est bien mélangé; une faible stratification suffit alors à le bloquer, tandis que si la pycnocline est en profondeur, le panache encore très dynamique et peu dilué parvient à la percer même si la stratification est importante.

### \* INFLUENCE DES COURANTS (INTENSITE ET ROTATION)

A partir du moment où le panache est bloqué sous la surface, le profil des courants en intensité et direction a peu d'influence sur la profondeur de captage, puisque les vitesses deviennent rapidement faibles en profondeur. Mais si elles sont encore supérieures à 3 cm/s, et si le courant dans les couches profondes est dans le même sens que le jet à l'émission, l'accélération du courant peut faire diminuer la profondeur  $z_c$  de blocage et rapprocher ainsi le panache de la surface, et ce de plusieurs mètres.

Les courants agissent également de façon importante sur la limite  $\delta\sigma_{lim}$  à partir de laquelle le panache n'atteint plus la surface. Cette influence est d'autant plus forte que la pycnocline est répartie sur une grande épaisseur et placée vers le haut de la colonne d'eau où les courants sont plus forts.  $\delta\sigma_{lim}$  peut varier à cause des courants de 0,5 à 2.

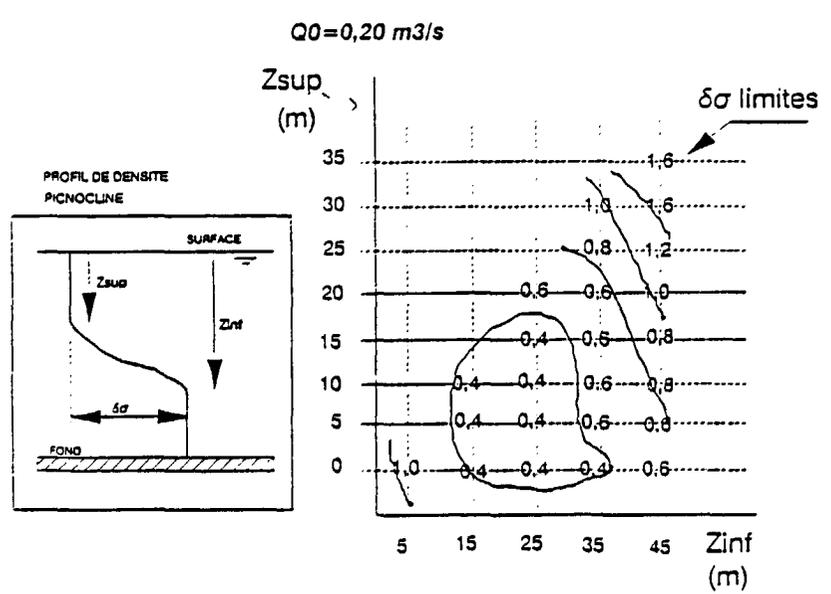
**PROFONDEUR DE CAPTAGE  
EN FONCTION DE LA STRATIFICATION**



Exemples de courbes correspondant à différents cas de profils de courants et de valeurs de  $Z_{sup}$

FIGURE II.7

$\delta\sigma$  limites à partir desquels le panache risque d'être capté en fonction de la forme de la pycnocline



### II.3 DIAMETRES D1 et D2

Rappelons la définition des diamètres D1 et D2 :

- le diamètre D1 est le diamètre du panache à son arrivée en surface ou à sa côte d'équilibre, et dans lequel est compris 84% de la masse injectée au fond
- le diamètre D2 est le diamètre du panache devenu "nuage initial" quand il s'est étalé horizontalement à sa côte d'équilibre. Sa limite est donnée par la distance au centre du panache à partir de laquelle la vitesse radiale d'étalement est réduite à 3 cm/s

#### A. MILIEU HOMOGENE

Dans notre cas, le diamètre D1 est compris entre 10 et 30 mètres tandis que le diamètre D2 est compris entre 35 et 60 mètres, le plus souvent proche de 50 mètres. Il diminue lorsque les courants sont forts sur une grande profondeur d'eau. Il ne varie pas en fonction de la rotation du courant et très peu en fonction de l'angle par rapport à l'émissaire

#### B. MILIEU STRATIFIE

La *figure II.8* décrit les résultats pour le diamètre après étalement, en fonction de la profondeur de captage. Chaque point correspond à un cas de profil de courant, de forme de pycnocline et de stratification.

Si le panache arrive en surface ( $h_c=44,5m$ ), les diamètres sont du même ordre de grandeur que dans le cas homogène ( $D1=10$  à  $25$  mètres et  $D2=15$  à  $60$  mètres).

Si le panache est bloqué en profondeur par densité, le diamètre avant étalement D1 croit vers la surface de 5 à 20 mètres. Après étalement, D2 passe de 20-30 mètres quand le panache est bloqué en profondeur jusqu'à 60-80 mètres en surface. Les diamètres atteignent parfois des valeurs importantes (jusqu'à 40-70 mètres pour D1 et 120-150 mètres pour D2), ceci lorsque l'épaisseur d'étalement est très faible (inférieure à 2 mètres).

Si le panache, arrivé presque en surface, est bloqué par vitesse verticale faible, le diamètre est très variable, de 20 à 40 mètres avant étalement (D1) et de 40 à 140 mètres après étalement (D2).

Le rapport entre D1 et D2 varie de 2 à 6 selon les cas.

#### \* INFLUENCE DU PROFIL ET DE L'INTENSITE DE STRATIFICATION - INFLUENCE DES COURANTS

Le diamètre D1 avant étalement varie en général peu avec la stratification et les courants. Il augmente légèrement (de 10-15m) lorsque  $\delta\sigma$  atteint la limite  $\delta\sigma_{lim}$  à partir de laquelle le panache commence à être capté. Lorsque pour des  $\delta\sigma$  supérieurs, le panache a atteint une profondeur d'équilibre constante, le diamètre ne varie plus non plus.

Le diamètre D2 après étalement a un comportement semblable avec des valeurs plus fortes et des variations plus importantes.

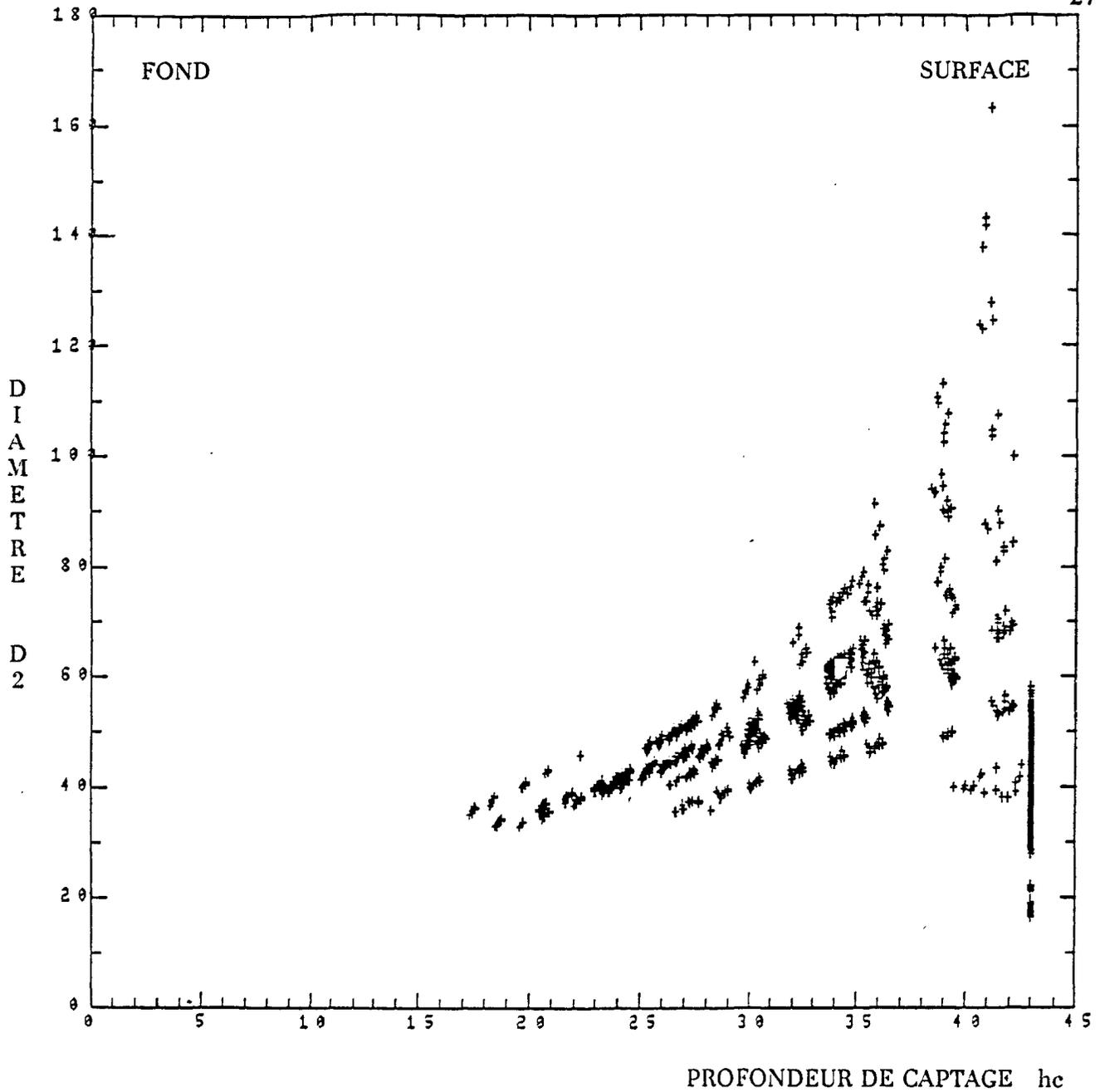


FIGURE II.8 : RESULTATS DU PROGRAMME JET DANS DIFFERENTS CAS DE STRATIFICATION ET DE COURANTS.  
DIAMETRE DU PANACHE APRES ETALEMENT HORIZONTAL EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE CAPTAGE

## II.4 EPAISSEUR $E_p$

### A. MILIEU HOMOGENE

L'épaisseur du nuage est en général comprise entre 3 et 4 mètres. Elle diminue lorsque le courant augmente sur la colonne d'eau, notamment s'il est fort et tournant.

Le modèle trouve parfois des valeurs très faibles, peu réalistes, qui correspondent à un courant en surface  $V_0$  fort (ici égal à 30 cm/s) et une épaisseur de la couche courant importante (50 mètres). Le panache est capté sous la surface du fait de sa vitesse verticale très faible.

### B. MILIEU STRATIFIE

La *figure II.9* décrit, comme pour le diamètre, l'ensemble des résultats en fonction de la profondeur et pour les différents cas de blocage.

Lorsque le panache est bloqué juste au dessous de la surface, par manque de vitesse verticale, l'épaisseur est de l'ordre de 50 cm à 1 mètre. Si la capture du panache est due à l'équilibre des densités, l'épaisseur augmente avec la profondeur.

On observe sur ce graphe des épaisseurs différentes (à 1 ou 1,5 mètre près) pour un même  $z_c$ , qui correspondent à des directions de courant différentes, l'épaisseur la plus forte étant trouvée lorsque le courant dans le milieu va dans le même sens que la vitesse d'émission du jet.

Si le panache atteint la surface malgré une stratification dans la colonne d'eau, l'épaisseur peut varier selon les cas entre 0,5 et 10 mètres. En effet, dans certains cas, le panache atteint la surface avec un reliquat de flottabilité très faible et l'épaisseur du panache étant calculée à partir de la hauteur correspondant à la section critique d'écoulement, elle est fonction de la différence de densité entre le milieu ambiant et le panache. Lorsque cette différence tend vers zéro, l'épaisseur calculée augmente (6-8 mètres au lieu de 3-4m), jusqu'à des valeurs très importantes mais qui ne semblent pas réalistes.

### \* INFLUENCE DU PROFIL DE DENSITE ET DE LA STRATIFICATION - INFLUENCE DES COURANTS

Nous avons vu que la forme de la pycnocline et la stratification déterminaient la profondeur de captage et qu'il existait une stratification limite  $\delta\sigma_{lim}$  à partir de laquelle le panache était bloqué sous la surface. La profondeur  $z_c$  augmentait rapidement en même temps que  $\delta\sigma$ , jusqu'à se stabiliser pour des  $\delta\sigma$  plus grands.

Pendant le passage entre les deux états (panache en surface et panache bloqué à une profondeur quasi-constante quelle que soit  $\delta\sigma$ ), les caractéristiques du panache se modifient en même temps que la profondeur.

Juste avant d'être capté ( $\delta\sigma < \delta\sigma_{lim}$ ), l'épaisseur  $E_p$  augmente (dro devenant faible), puis, lorsque  $\delta\sigma$  est supérieur à  $\delta\sigma_{lim}$ , elle diminue brutalement pour atteindre une valeur constante, dépendant de la profondeur et des courants.

L'intensité et la direction des courants agissent sur la profondeur de captage et donc sur son épaisseur. A même profondeur  $z_c$ , l'épaisseur varie en fonction des vitesses de courant, elle est d'autant plus faible que les courants sont forts et ce sur une couche d'eau plus épaisse.

## II.5 HAUTEUR DU DOME $h_d$

Lorsque le panache est bloqué en profondeur, il forme un dôme au-dessus de sa côte d'équilibre. La hauteur  $h_d$  de ce dôme croît de 4 à 8 mètres avec la côte de captage  $h_c$ . A partir de 10 mètres sous la surface, le dôme affleure à la surface libre.

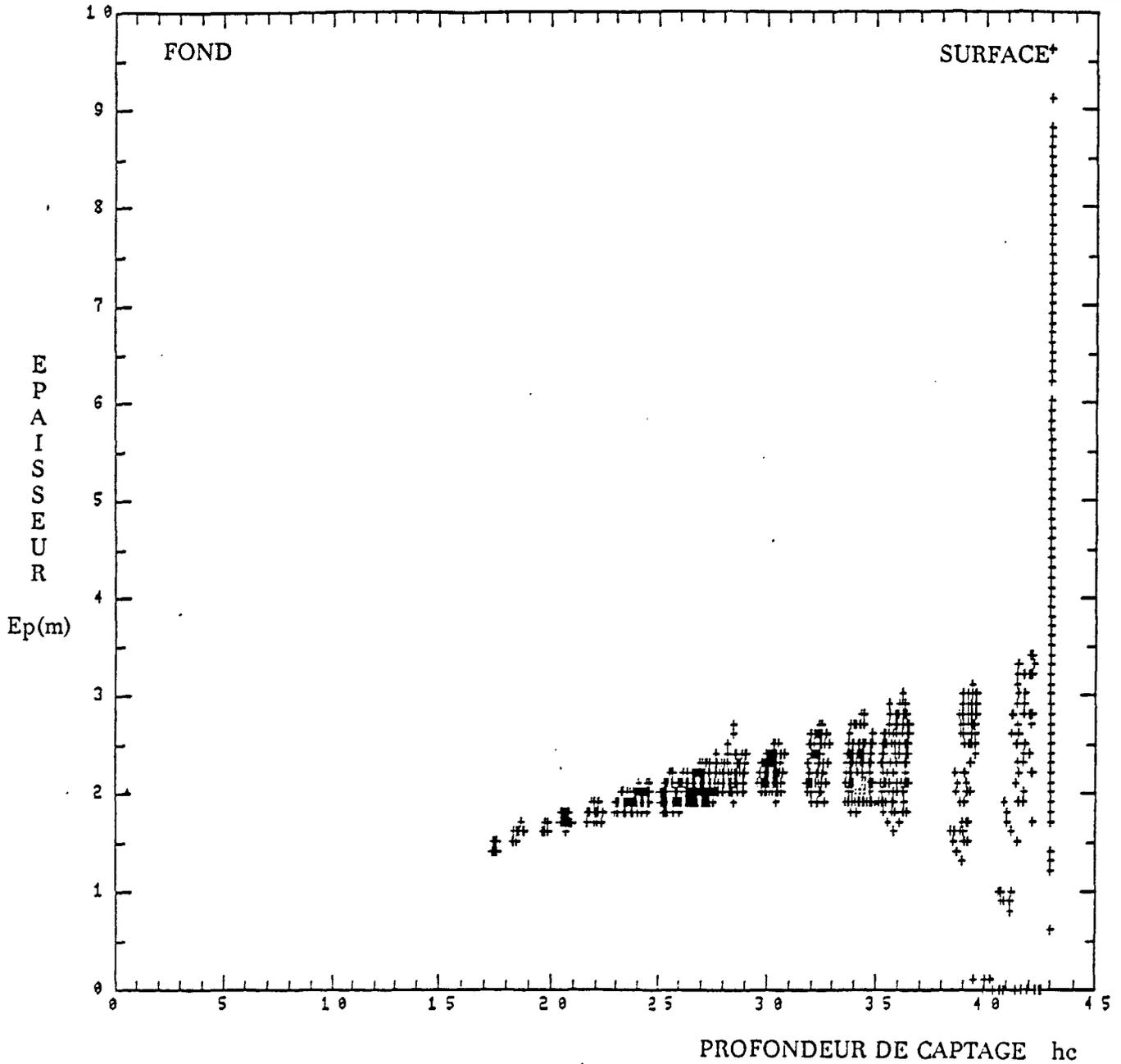


FIGURE II- 9

RESULTATS DU PROGRAMME JET DANS DIFFERENTS CAS DE STRATIFICATION ET DE COURANTS.  
 EPAISSEUR DU PANACHE APRES ETALEMENT HORIZONTAL EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE CAPTAGE.

## II.6 DILUTION $D_L$

Rappelons la définition de la dilution :

La dilution est égale au rapport entre la concentration du polluant à la sortie de l'émissaire et sa concentration sur l'axe à une profondeur donnée. Elle correspond à un rapport de débit (celui du panache sur celui de l'effluent); le débit dans la section du panache étant calculée à travers une surface comprenant 84% de la masse.

### A. MILIEU HOMOGENE

La dilution croit fortement avec le courant. Elle est indépendante de l'angle  $\beta$  en surface par rapport à l'émissaire. La rotation du courant  $d\beta$  sur la profondeur prend de l'importance pour des courants forts supérieurs à 15 cm/s en surface.

Pour des courants très faibles (5 cm/s), la dilution varie peu (entre 50 et 60). Pour des courants de l'ordre de 10 cm/s, elle ne dépasse pas 70. Elle peut atteindre 85, 100 et 170 pour des courants maximums en surface de 15, 20 et 30 cm/s respectivement. Lorsque le courant tourne beaucoup et qu'il est fort, la dilution est plus faible (100-110 au lieu de 155-165), le panache est alors capté sous la surface et son épaisseur est faible.

### B. Milieu stratifié

La dilution varie en fonction de la profondeur de captage. La *figure II.10* rassemble les valeurs de dilution dans les différents cas testés, chaque point représentant le résultat pour des valeurs particulières de  $\delta\sigma$ ,  $z_{inf}$ ,  $z_{sup}$ ,  $V_0$ ,  $z_p$ ,  $\beta$  et  $d\beta$ .

La dilution  $D_L$  augmente en fonction de  $h_c$  ; égale à 10-30 en profondeur, elle atteint 100, parfois 140 en surface.

#### \* INFLUENCE DU PROFIL DE DENSITE

Hormis le passage de l'état "panache en surface" à l'état "panache bloqué en profondeur", qui détermine une variation de la dilution en même temps qu'un changement de profondeur de blocage, l'influence du profil de densité est généralement faible.

#### \* INFLUENCE DE LA STRATIFICATION $\delta\sigma$

Comme l'épaisseur, la dilution augmente et atteint un maximum lorsque  $\delta\sigma$  est proche de  $\delta\sigma_{lim}$ . Elle diminue ensuite plus ou moins rapidement jusqu'à une valeur quasi-stationnaire.

Lorsque  $\delta\sigma_{lim}$  est faible ( $< 0,8$ ), c'est à dire quand  $z_{inf}$  est inférieur à 25 mètres, on observe une décroissance lente de la dilution, qui devient ensuite relativement constante pour des  $\delta\sigma$  forts ( $> 1,8$ ).

Si  $\delta\sigma_{lim}$  est plus fort ( $> 0,8$ ), la dilution passe par un maximum, avant de décroître

#### \* INFLUENCE DES COURANTS

La dilution varie beaucoup en fonction des courants. Cette variation est d'autant plus forte que la côte de blocage est proche de la surface, le panache étant soumis à des courants plus forts.

A même profondeur de captage, la dilution varie en fonction des courants s'ils vont dans le même sens que la vitesse d'émission du jet.

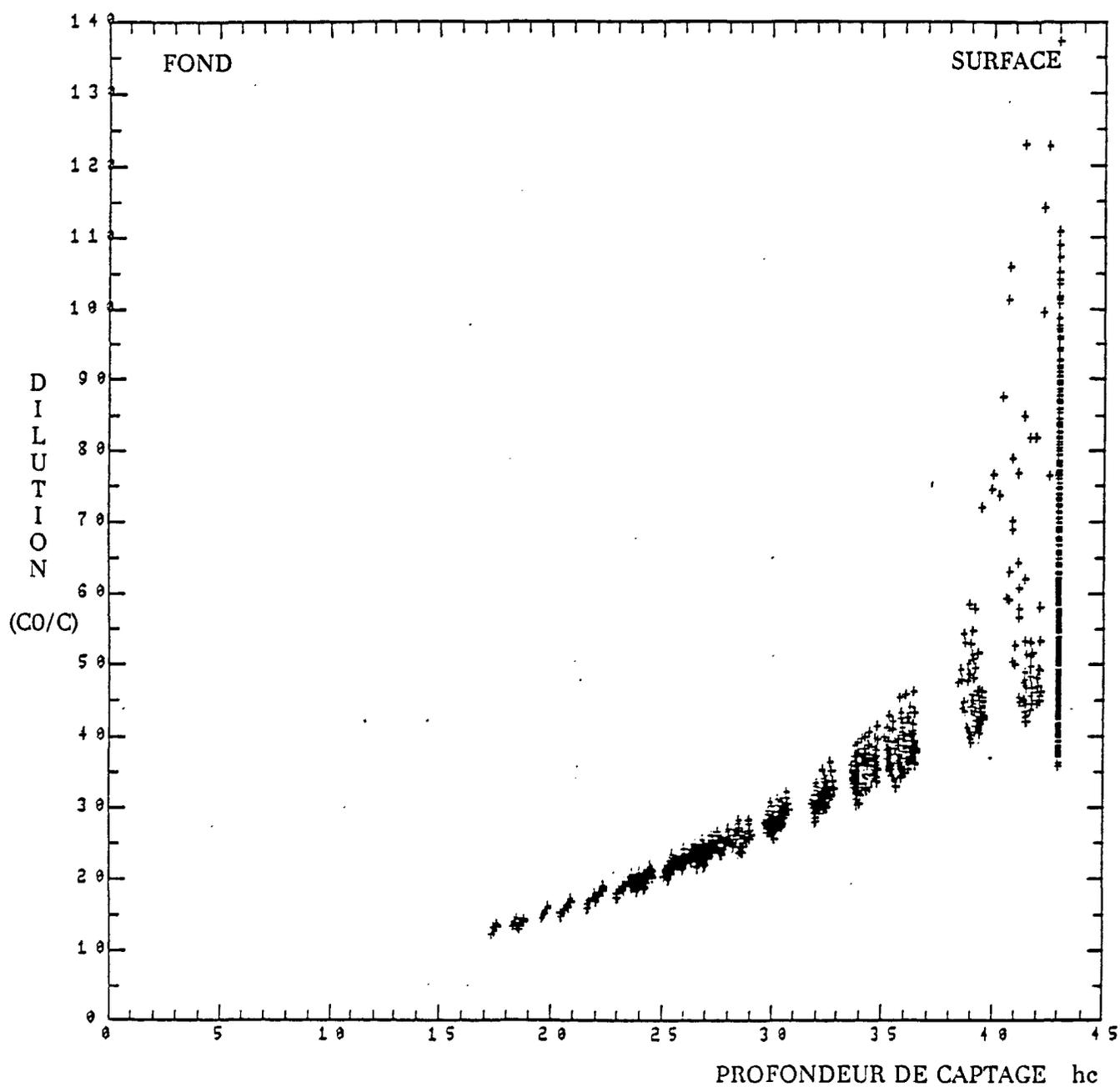


FIGURE II-10

RESULTATS DU PROGRAMME JET DANS DIFFERENTS  
CAS DE STRATIFICATION ET DE COURANTS.  
DILUTION A LA COTE D'EQUILIBRE DU PANACHE  
EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE CAPTAGE

## II.7 LES FLUX DE MATIERE INTRODUIITS

Le flux total de matière introduit dans le milieu ambiant est égal au produit du débit par la concentration en sortie d'émissaire.

Avant son étalement horizontal, la répartition des concentrations dans le panache, sur une coupe perpendiculaire à l'axe, est gaussienne. Pendant son étalement dans le "champ proche", le rejet se diffuse sur une certaine épaisseur dépendant de la dynamique du panache et de son diamètre  $D1$ . La répartition horizontale des concentrations dans ce "champ proche" dépend des vitesses radiales d'étalement et du courant à la profondeur correspondante.

Le modèle horizontal de transport et mélange ne peut prendre en compte l'anisotropie des courants créée par cet étalement initial. La répartition des concentrations résultantes est donc introduite dans le modèle à travers les flux injectés dans les mailles du modèle qui correspondent à la zone du "champ proche".

La dimension de cette zone d'étalement initial, dans laquelle se répartit la masse totale introduite par le rejet est caractérisée par le diamètre du panache  $D2$  calculé "après étalement".

Ce diamètre  $D2$  est en général de l'ordre de 20 à 80 mètres, c'est à dire de 2 à 6 fois plus grand que  $D1$  (cf II.3.B). Partant d'une répartition gaussienne, la masse s'étale horizontalement selon la force des vitesses radiales, l'intensité et les directions du courant moyen (*figure II.11*).

Le bilan des flux apportés par le panache de remontée et par l'étalement horizontal est réalisé dans la maille centrale de diamètre 20 mètres, et autour dans les mailles adjacentes jusqu'à une distance de 30 mètres autour du centre (diamètre = 60 mètres).

Nous verrons que la précision du calcul de transport-diffusion horizontal par le modèle en couches n'est pas suffisante pour connaître précisément les concentrations dans la zone de rejet, 50 mètres autour du centre du panache. La condition limite donnée dans le "champ proche" sera donc déterminée par le flux total apporté par le rejet, qui sera injecté dans la maille centrale en négligeant l'étalement que le modèle horizontal effectue de manière fictive par diffusion numérique.

Les résultats du calcul simplifié de l'étalement et des flux ne sont donc pas présentés ici puisqu'ils ne seront pas utilisés ensuite dans le modèle de transport horizontal.

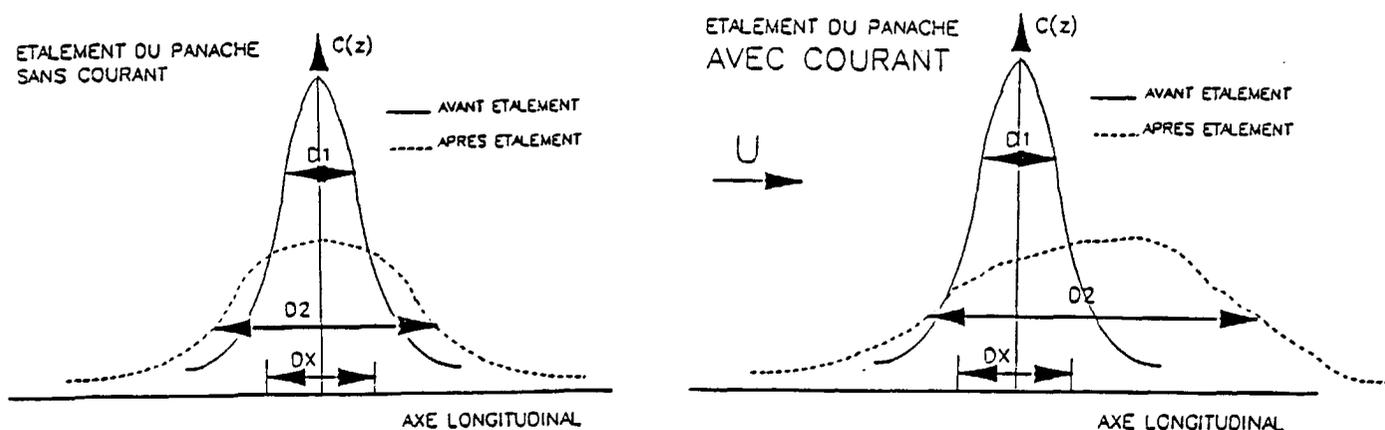


Fig. II.11 : Schéma d'étalement du panache à sa côte d'équilibre.

## II.8 TESTS DU MODELE JET EN FONCTION DES COURANTS

### A. TEST SUR LA PRISE EN COMPTE DE LA ROTATION DU COURANT

D'après l'analyse précédente, les résultats du modèle JET sont sensibles à la prise en compte d'un courant tournant en fonction de la profondeur si le courant en surface est supérieur à 15 cm/s. Or les courants étant en général faibles au fond, les mesures de cap ne sont pas précises. Il serait donc intéressant de connaître à partir de quelle profondeur la rotation du courant devient un paramètre négligeable pour le comportement du panache.

Des tests ont été effectués en milieu homogène, avec des courants relativement faibles au fond (l'intensité du courant suivant une loi de décroissance exponentielle).

Si le courant en surface  $V_0$  est faible ( $< 15$  cm/s), le fait de négliger la rotation du courant en-dessous de 30 mètres, ne modifie pas les résultats (variation de la dilution  $< 4$  %). Si la rotation est négligée au dessous de 15 mètres, son influence est minime ( $< 10$  %).

Avec un courant  $V_0$  plus fort ( $\text{max} = 30$  cm/s), l'importance de la rotation du courant au-dessous de 30 mètres reste encore faible. Elle devient plus importante dans la couche d'eau supérieure, entre 15 et 30 mètres (variation de 10 à 20 % sur la dilution).

Une rotation régulière du courant sur toute la colonne d'eau induit des variations sur la dilution allant de 20 à 35 %. Une rotation du courant dans la couche d'eau allant du fond jusqu'à 15 mètres sous la surface induit des variations de 10 à 20 % tandis que sur les 15 mètres au dessus du fond, les variations de la dilution dues à une rotation du courant ne sont plus que de 2 à 5 %.

En conclusion, il semble que la prise en compte, dans le calcul d'un panache, de la rotation du courant dans le milieu récepteur est nécessaire seulement dans la couche superficielle entre la surface et jusqu'à 20 ou 30 mètres de profondeur. Le cisaillement dû aux directions variables du courant provoque des variations de la dilution non négligeables surtout si le courant est fort. L'adaptation par la SOGREAH du modèle JET en tridimensionnel permet de le calculer.

### B. INFLUENCE DE COURANTS FORTS EN PROFONDEUR

Les mesures de courant réalisées au fond (- 41 mètres) ont montré que les courants sont en général faibles : en moyenne 2 à 5 cm/s. Nous avons mesurés néanmoins des maxima de l'ordre de 10 à 15 cm/s, exceptionnellement 20 cm/s (THOUVENIN-1988).

Les essais qui ont permis de faire les tests précédents ont été effectués en prenant des courants faibles au fond (2 à 4 cm/s). Le courant est supposé être dû principalement au vent ; il décroît exponentiellement de la surface au fond. La profondeur  $z_p$  de la couche courant a été prise au maximum égale à 30 mètres en régime stratifié et 50 mètres en régime homogène.

De nouveaux essais ont été réalisés en utilisant des courants plus forts au fond.

Des variations notamment dans la dilution, la profondeur de captage et l'épaisseur de la tache, commencent à devenir importantes lorsque le courant au fond devient supérieur à la moitié du courant en surface, ou plus généralement lorsqu'il est supérieur à 10 cm/s. Elles sont observées lorsque la stratification  $\delta\sigma$  est faible, proche de  $\delta\sigma_{lim}$ , pour laquelle le panache est instable et dépend plus fortement des courants.

## II.9 INFLUENCE DE LA DENSITE DE L'EFFLUENT ET DE LA DENSITE AU FOND DANS LE MILIEU RECEPTEUR SUR LES PARAMETRES DU PANACHE

Plusieurs densités de l'effluent ont été testées, correspondant aux températures mesurées dans l'eau sortant de la station d'épuration :

T = 12°C	= >	densité = 0,9995	(Hiver)
T = 15°C	= >	densité = 0,9991	
T = 20°C	= >	densité = 0,9982	
T = 25°C	= >	densité = 0,9970	(Eté)

Entre la station d'épuration et la sortie en mer, le rejet s'écoule pendant environ 30 à 45 minutes à travers l'émissaire immergé dans le milieu marin. En été, la température au fond peut être froide et il est possible que celle du rejet perde quelques degrés pendant son parcours, se rapprochant alors de celle du milieu récepteur.

Dans le milieu récepteur, plusieurs densités au fond ont été testées. Dans le cas homogène, elle correspond à la densité constante du milieu récepteur. Elle varie de 1,026 à 1,029.

En période homogène, la densité de l'effluent et celle du milieu récepteur n'ont pas d'influence notable sur les résultats, excepté peut-être pour l'épaisseur dans les cas extrêmes où le courant est fort et tournant.

En période stratifié, nous avons testé la variation de la différence entre la densité du fond et la densité de l'effluent. Elle n'entraîne pas non plus de modifications importantes des caractéristiques du panache, excepté dans quelques cas où vraisemblablement une faible variation de la densité provoque le blocage du panache.

## II.10 INFLUENCE DU DEBIT DE L'EFFLUENT SUR LES RESULTATS DU PROGRAMME JET

Le débit moyen journalier de l'effluent à travers l'émissaire varie entre 360 m<sup>3</sup>/h (0,1 m<sup>3</sup>/s) en été et 2700 m<sup>3</sup>/h (0,75 m<sup>3</sup>/s) par temps d'orage. La moyenne des débits se situe entre 0,15 et 0,20 m<sup>3</sup>/s, mais en fait, les débits sont en général inférieurs à 0,20 m<sup>3</sup>/s. 20% seulement des débits dépassent cette valeur, mais par gros orage il peuvent atteindre des maxima très importants (*figure II.12*).

D'après l'étude préliminaire sur l'évolution des débits, réalisés sur trois mois d'enregistrements (novembre, avril, août 1984), le débit varie également pendant la journée jusqu'à 40% autour de la moyenne journalière. Les débits instantanés peuvent donc être plus faibles que la valeur minimale journalière, surtout en été. Pendant cette période sans pluie, où le débit moyen est faible (500 m<sup>3</sup>/h = 0,14 m<sup>3</sup>/s), on observe couramment des débits nocturnes de l'ordre de 200 m<sup>3</sup>/h (0,05 m<sup>3</sup>/s).

Les tests ont été réalisés en faisant varier le débit entre 0,04 et 0,75 m<sup>3</sup> /s.

### A. MILIEU HOMOGENE

Le panache remonte toujours en surface. Par débit faible (<0,15m<sup>3</sup>/s) et vitesse du milieu forte et tournante ( $V_0=30$  cm/s et  $z_p=50$  m), le panache est capté par manque de vitesse verticale juste en-dessous de la surface (-4 mètres maximum) ; la dilution augmente alors beaucoup tandis que l'épaisseur tend vers 0.

FIGURE II.12

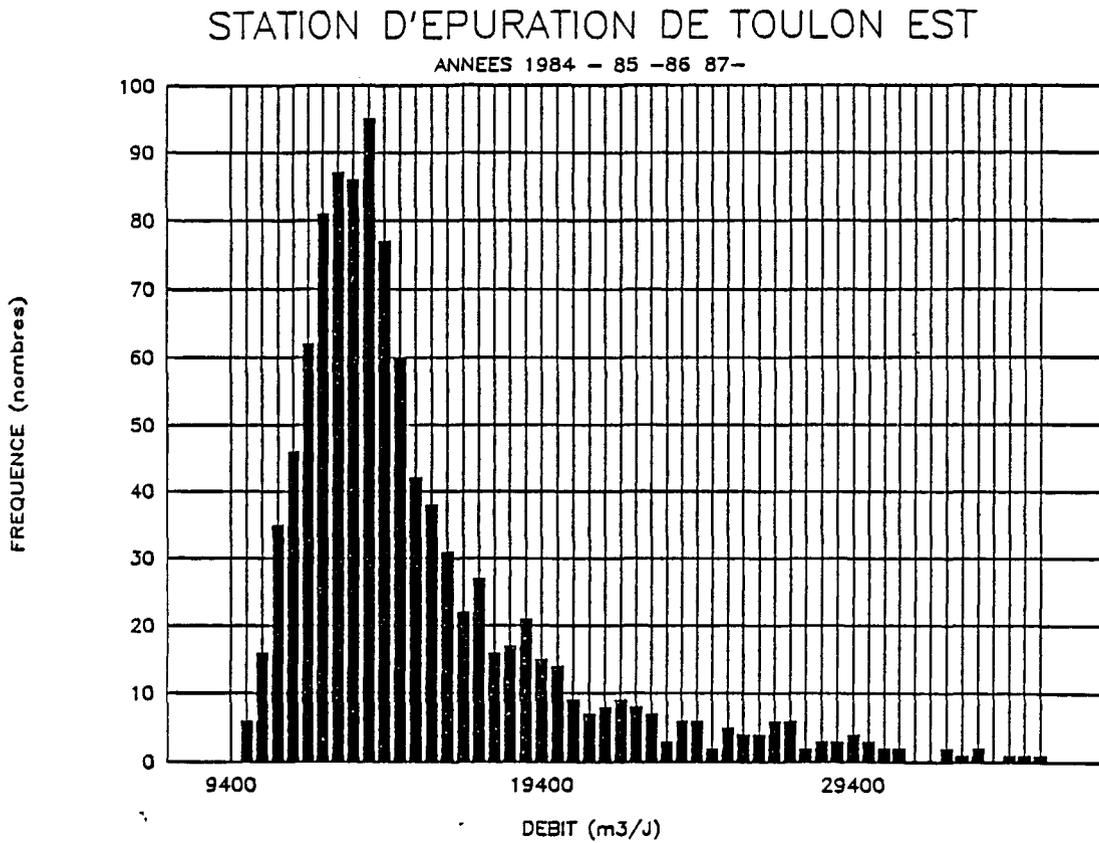
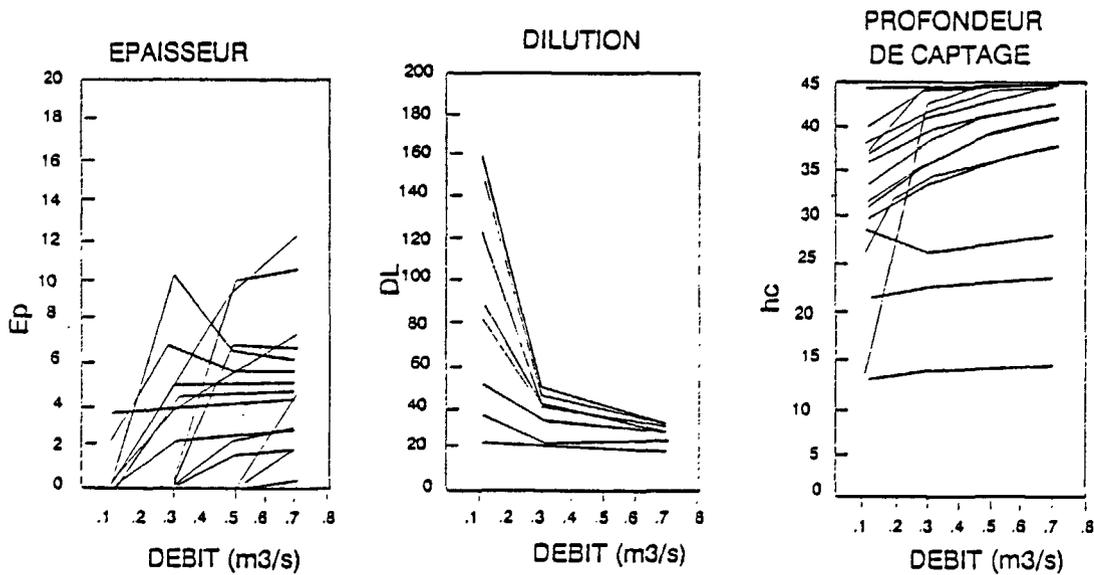


FIGURE II.14



Variation des caractéristiques du panache en fonction du débit de l'effluent.  
MILIEU STRATIFIE

Chaque courbe correspond à un cas de profil de courants,  
de forme de pycnoline et de stratification.

Seuls quelques exemples sont représentés.

FIGURE II.13a

Limite  $\delta\sigma^*u^*$  de stratification à partir de laquelle le panache risque d'être capté par manque de vitesse verticale.

Variation en fonction du débit de l'effluent pour différentes formes de pycnocline ( $z_{inf}, z_{sup}$ )

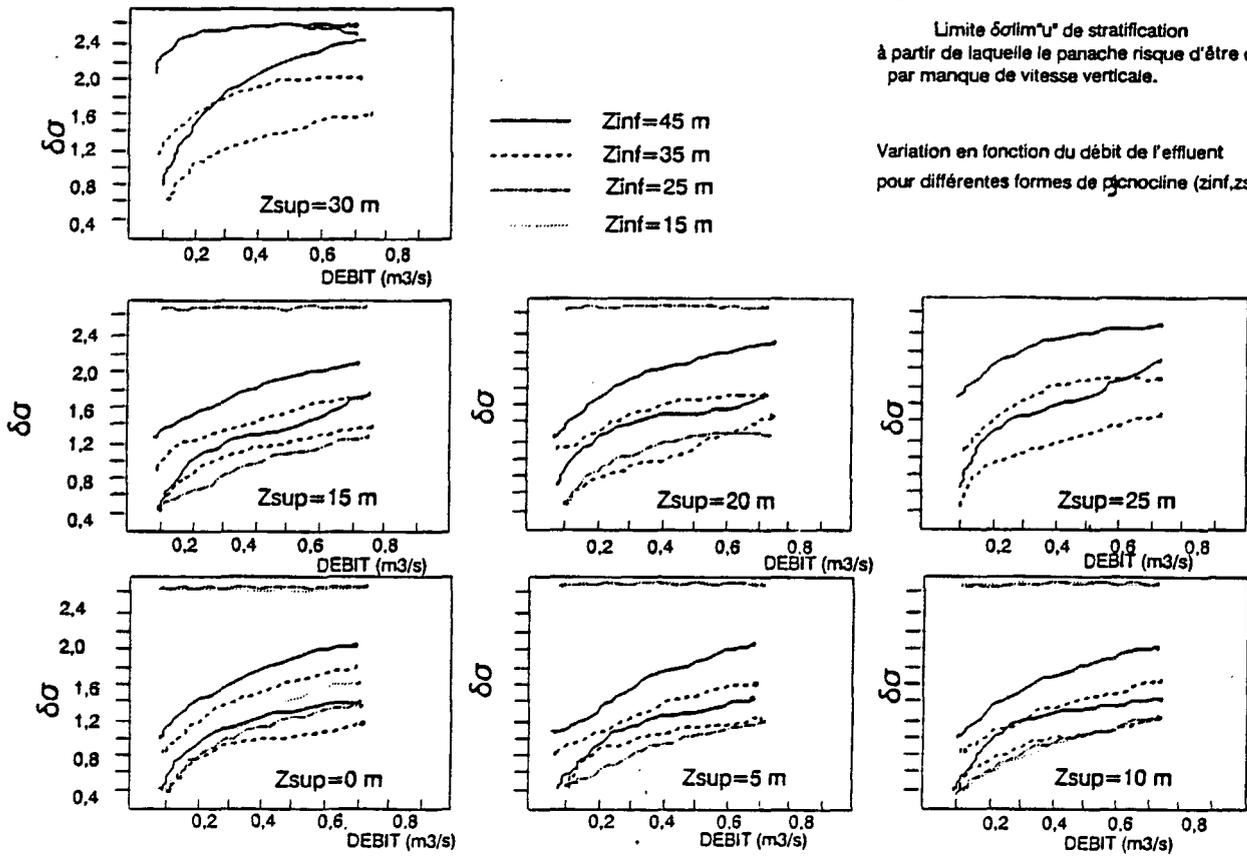
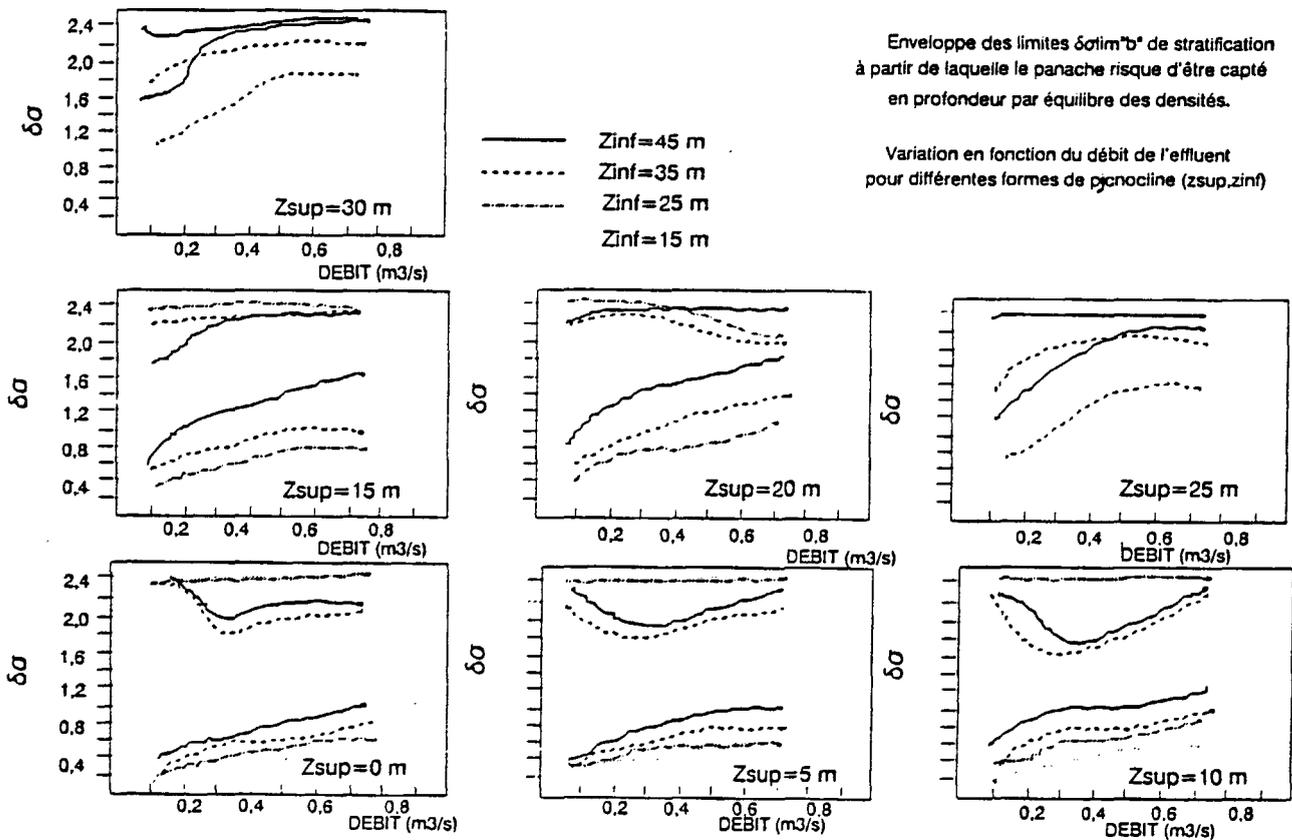


FIGURE II.13b

Enveloppe des limites  $\delta\sigma^*b^*$  de stratification à partir de laquelle le panache risque d'être capté en profondeur par équilibre des densités.

Variation en fonction du débit de l'effluent pour différentes formes de pycnocline ( $z_{sup}, z_{inf}$ )



Lorsque le débit augmente :

- \* La distance horizontale  $d$  de sortie augmente sans dépasser 20 mètres.
- \* Le diamètre après étalement augmente quasi linéairement en fonction du débit. Il est de l'ordre de 30 à 50 mètres par débit faible et atteint 90 à 110 mètres par débit fort.
- \* L'épaisseur de la tache est comprise entre 2,5 et 5 mètres,
- \* La dilution diminue en fonction du débit. Très variable lorsque le débit est faible (entre 80 et 170) à cause du captage par les courants horizontaux, elle tend vers des valeurs plus constantes pour des débits forts (entre 30 et 50).

On constate que les résultats sont plus sensibles au profil de courant lorsque le débit est faible et notamment dans la gamme de variation du débit correspondant à celle la plus rencontrée dans la nature (0,11-0,20).

## B. MILIEU STRATIFIE

### 1. Stratification limite $\delta\sigma_{lim}$

Dans le cas d'un milieu stratifié, on a calculé, pour plusieurs valeurs de débit, la limite  $\delta\sigma_{lim}$  à partir de laquelle le panache risque d'être capté en profondeur. Sur les figures II.13a et II.13b sont tracées en fonction du débit les valeurs minimales et maximales de  $\delta\sigma_{lim}$  rencontrées en testant différentes conditions de courant pour chaque forme de profil.

La figure II.13a donne la limite  $\delta\sigma_{limu}$  à partir de laquelle le panache est capté par vitesse verticale faible.  $\delta\sigma_{limu}$  croît assez rapidement en fonction du débit.

La figure II.13b donne la limite  $\delta\sigma_{limb}$  à partir de laquelle le panache est bloqué par densité. Lorsque la pycnocline démarre près de la surface ( $z_{sup} = 0, 5, 10$  et  $15$  mètres),  $\delta\sigma_{limb}$  reste relativement constante quel que soit le débit. Si la pycnocline est proche du fond et la couche de surface est homogène jusqu'à 20 mètres, la limite est plus sensible au débit.

Selon la forme du profil de courant en intensité et directions (différentes valeurs de  $V_0, z_p, \beta_0$  et  $d\beta$ ), les stratifications limites varient de façon assez importantes, 0,4 environ et dans certains cas, lorsque la pycnocline est proche de la surface ( $z_{inf} = 15$  et  $25$  mètres), les stratifications limites  $\delta\sigma_{lim}$  sont maximales (2,4).

Pour des débits inférieurs à  $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ , la stratification limite minimale est très faible ( $< 0,2$ ).

### 2. Caractéristiques du panache

Les caractéristiques du panache ( $z_c, D_1, h, d, D_1, D_2$ ) varient également en fonction du débit (figure II.14), mais surtout lorsque le débit est faible ou moyen, variant de 0,1 à 0,3  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Comme en période homogène, la dilution est très variable et peut être très forte avec un débit très faible; elle diminue fortement lorsque le débit atteint 0,3 puis elle reste relativement constante, de l'ordre de 20 à 60.

L'épaisseur et la hauteur du dôme varient selon le changement du comportement du panache, capté ou arrivant en surface. Elles augmentent légèrement avec le débit.

La distance horizontale augmente en fonction du débit et dépasse dans certains cas 20 mètres.

## II.11 UTILISATION DES ABAQUES SIMPLIFIEES DE LA SOGREAH

En milieu homogène au repos, la SOGREAH (1983) fournit des abaques, permettant de calculer la dilution de l'effluent en fonction du rapport  $H/(Fd_0)$  (H:profondeur totale ; F:nombre de FROUDE ;  $d_0$ :diamètre de l'émissaire).

Dans notre cas, le nombre de FROUDE croît en fonction du débit de 0,5 à 7; le rapport  $H/Fd_0 = n$  est alors toujours supérieur à 10 et on obtient sur l'abaque de la SOGREAH la partie droite de la courbe (*figure II.15*).

Cette branche asymptotique correspond aux cas les plus fréquemment rencontrés en assainissement, et la SOGREAH propose pour simplifier la formule générale suivante pour la dilution à 90% :

$$T_m = 0,15 \cdot H^{3/2} \cdot u_0^{-1/2} \cdot d_0^{-5/4}$$

La *figure II.16a* reproduit les résultats de cette formule, dans le cas de TOULON (H=44,5 m;  $d_0=0,57$ m); les valeurs sont 1,5 à 2 fois plus fortes que les dilutions trouvées directement par le programme JET. Celui-ci calcule en effet des dilutions à 84%, c'est-à-dire en prenant le débit du panache à travers une surface comprenant 84% de la masse, au lieu de 90% dans la formule générale précédente.

Cette formule est utilisée ici pour déterminer en première approximation la variabilité des résultats en période homogène en fonction de la profondeur et du diamètre de l'émissaire.

Une liste des 27 émissaires urbains de la région P.A.C.A. présentée sur le tableau T1 montre que la profondeur des émissaires peut aller de 10 à 100 mètres, 7 étant égales à 20 m; 10 étant comprises entre 40 et 50 mètres. Le diamètre varie entre 0,25 et 2 mètres, 9 entre 0,25 et 0,4, 10 entre 0,4 et 0,6, et 5 vers 0,7 et 0,8m.

Les *figures II.16b et II.16c* représentent l'évolution de la dilution en fonction de la profondeur et du diamètre de l'émissaire, pour différents débits d'émission. On constate que lorsque les débits sont forts, les dilutions varient plutôt lentement avec la profondeur et le diamètre du rejet, alors que lorsque le débit est faible, la dilution devient plus sensible aux caractéristiques du rejet.

Les résultats calculés pour le rejet de TOULON-EST semblent donc représentatifs des émissaires ayant une profondeur égale à 44,5 mètres à 2 ou 3 mètres près seulement à cause des débits faibles.

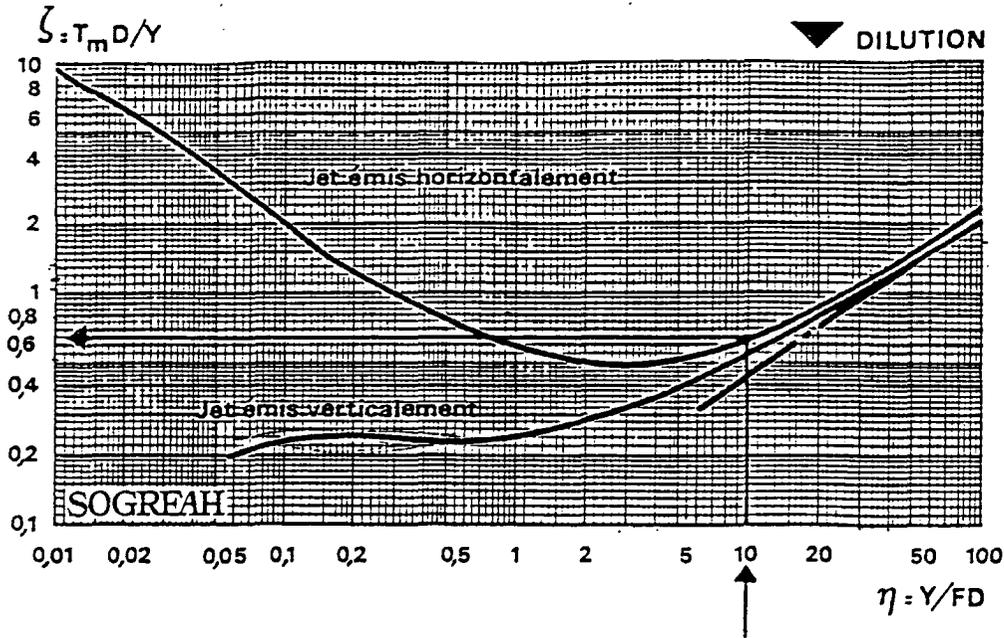


FIGURE II-15

## LISTE DES EMISSAIRES URBAINS DE LA REGION P.A.C.A.

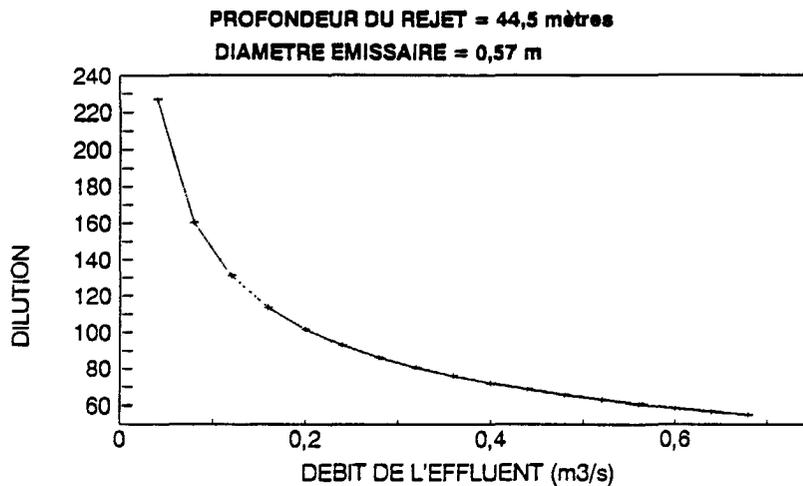
N°	NOM	MAITRE D'OUVRAGE	LONGUEUR (m)	PROF. (m)	DIAMETRE (mm)	MATERIAU
1301	SI CARRY-SAUSSET	SI CARRY-SAUSSET	550	13	400	BETON/AME TOLE
1302	CASSIS	CASSIS	140	12	500	BETON/AME TOLE
8301	POINTE GRENIER	ST CYR-LES LECQUES	reste 920	50	250	PVC+ACIER (ACIER 500/220m PUIS PVC 250
8302	LA CRIDE	SI BANDOL-SANARY	1 600	45	700	BETON/AME TOLE
8303	STE MARGUERITE	SI TOULON-EST	1 800	42	400+400	PVC+ACIER (SUR 80ml seult)
8304	ALMANARE	SI BAIE DE GIENS	1 400	15	700	ACIER
8305	LA LONDE DES MAURES	LA LONDE DES MAURES	650	8	300	PVC
8306	LE BATAILLER	SI BORMES-LE LAYANOU	700+550	14	400+600	PVC + FONTE
8307	CAVALIERE	SI LE LAYANOU-LE RAYOL	1 000	45	300	PVC
8308	CAVALAIRE	SI CAVALAIRE	1 300	35	300	PVC
8309	BONNE TERRASSE	RAMATUELLE	2 000	45	300	ACIER SUR 1500m
8310	LA CITADELLE	ST TROPEZ	700	20	300	
8311	LES SARDINAUX	STE MAXIME	700	35	400	AME TOLE
8312	LA GAILLARDE	ROQUEBRUNE SUR ARGENS	610	14	300	
8313	LE REYRAN	SI FREJUS-ST RAPHAEL	1 200	31	700	
8314	AGAY	SI FREJUS-ST RAPHAEL	1 250	50	500	
0601	PORT LA GALERE	THEOULE SUR MER	1 000	100	250	PVC PRESS 168
0602	THEOULE	THEOULE SUR MER	500	20	250	ACIER
0602	CANNES	CANNES	1 150	85	1350	BETON/AME TOLE
0602	GOLFE-JUAN	VALLAURIS	2 000	35	500	ACIER
0602	BACON	ANTIBES	980	65	500	BETON/AME TOLE
0603	CAGNES SUR MER	CAGNES SUR MER	500	72	800	ACIER
0604	NICE	NICE	1 168	100	1600	ACIER
0605	CALIFORNIE	NICE	460	82	2000	ACIER
0606	CAUSSINIERE	ST JEAN CAP FERRAT	500	95	500	ACIER
0607	CAP MARTIN	ROUEBRUNE CAP MARTIN	1 000	70	500	ACIER
0608	MENTON	MENTON	1 200	53	800	BETON/AME TOLE

MAI 1987

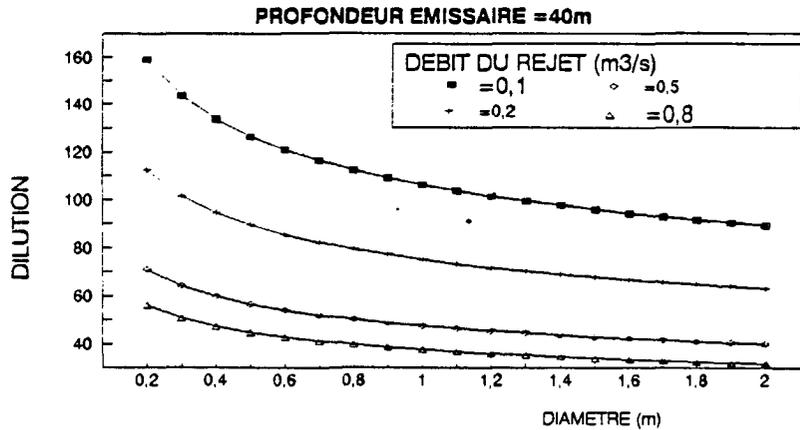
TABLEAU T 1

Figure II.16 : Evolution de la dilution en fonction des caractéristiques du rejet  
Calculs à partir de la formule simplifiée de la SOGREAH.  
Milieu au repos et homogène en densité.

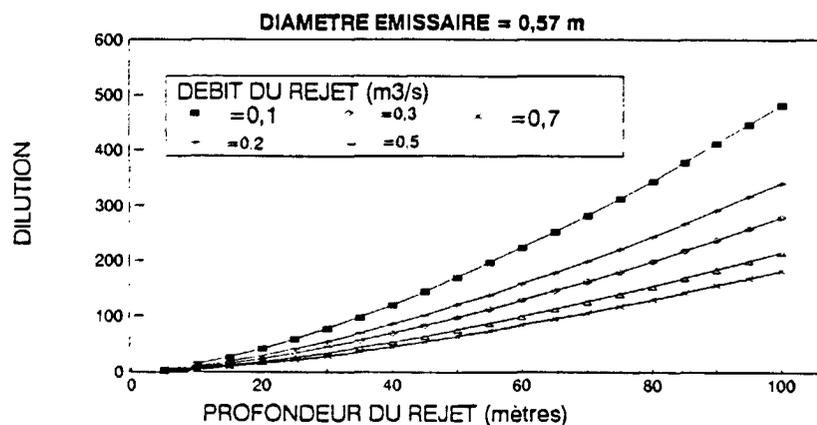
**(a) : débit de l'effluent**



**(b) : diamètre de l'émissaire**



**(c) : profondeur du rejet**



## SYNTHESE DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE DU PROGRAMME JET

L'analyse de sensibilité du comportement du panache en fonction des conditions du milieu a été conduite pour un rejet émis horizontalement par un émissaire de diamètre équivalent égal à 0,57 mètres placé à 44,5 mètres de profondeur. Ce cas d'école correspondant au rejet de TOULON-EST est représentatif des rejets ayant des caractéristiques voisines (profondeur égale à 2 ou 3 mètres près - diamètre égal à 20 cm près).

Nous avons pu constater que la densité de l'effluent et celle du milieu récepteur au niveau de l'émissaire n'ont pas d'influence sur le panache, sauf dans quelques cas exceptionnels.

La distance horizontale de développement du panache n'excède pas 20 ou 30 mètres autour de la sortie de l'émissaire, mais les autres caractéristiques du panache sont variables en fonction des courants, de la forme de la pycnocline et de la stratification (différence de densité entre la densité au fond et la densité en surface).

Il est difficile de déduire de cette étude des lois générales, étant donné le nombre de paramètres qui sont en jeu. Afin d'en synthétiser les résultats, nous avons donc tenté de les regrouper en "cas types", correspondant à différents profils de densités; chaque groupe provoque un comportement type du panache de remontée.

Douze cas ont été distingués à partir des caractéristiques communes du panache ; ils sont caractérisés par la profondeur inférieure ( $z_{inf}$ ) de la pycnocline et son épaisseur  $e$  ( $z_{sup} - z_{inf}$ ). Le tableau T2 récapitule, pour chaque cas, les résultats en termes d'épaisseur  $E_p$ , de diamètre  $D_1$  et de dilution  $D_L$ , en fonction de la profondeur de captage du panache.

L'évolution de la profondeur de captage en fonction de la stratification pour ces 12 cas types est représenté sur la *figure II.17*.

Deux valeurs caractéristiques de la stratification sont notés sur le tableau T2 :

- \* La stratification  $\delta\sigma_{lim_1}$  est la stratification moyenne limite à partir de laquelle le panache risque d'être capté et où ses caractéristiques changent.
- \* La stratification  $\delta\sigma_{lim_2}$  correspond à la stratification au-delà de laquelle le panache est bloqué et garde des caractéristiques presque constantes ou variant régulièrement.

Si  $\delta\sigma$  est inférieur à  $\delta\sigma_{lim_1}$ , le panache remonte jusqu'en surface et ses caractéristiques varient peu avec la stratification. Excepté lorsque la pycnocline est situé bien en profondeur (cas 8, 10, 11 et 12), cette première valeur caractéristique est très faible.

Quand  $\delta\sigma$  se rapproche de  $\delta\sigma_{lim_1}$ , les caractéristiques du panache commence à changer (l'épaisseur et la dilution augmente de façon importante); le panache atteint toujours la surface libre à 1 ou 2 mètres près, mais sa densité est presque en équilibre avec celle du milieu.

Entre les deux limites  $\delta\sigma_{lim_1}$  et  $\delta\sigma_{lim_2}$ , les résultats dépendent fortement de  $\delta\sigma$ , de la forme du profil, des densités du milieu et de l'effluent, et des courants qui peuvent avoir une influence importante sur son équilibre. Le panache est soit bloqué par densité soit par manque de vitesse verticale, avec, d'après le calcul de la SOGREA, une épaisseur du nuage initial très faible; la profondeur de captage augmente assez brutalement avec  $\delta\sigma$ .

Au delà de  $\delta\sigma_{lim_2}$ , le panache est capté à une côte de blocage stabilisée, qui augmente plus ou moins lentement avec  $\delta\sigma$ . Plus l'épaisseur de la pycnocline est importante (cas 6, 9, 10), plus grande est la pente d'augmentation de  $z_c$  en fonction de la stratification.

En période homogène ( $\delta\sigma < 0,3$ ) ou lorsque la pycnocline est très profonde (30-45 mètres) avec une stratification  $\delta\sigma < 1,6$  ou bien encore lorsque la pycnocline est placée très en surface au-dessus de 5 mètres (groupes 1 et 2), le panache est cantonné dans les 4 premiers mètres sous la surface. Les courants en profondeur ont peu d'influence sur la remontée du panache sauf s'il sont vraiment forts ( $> 10\text{cm/s}$ ) et ils n'en auront aucune lors de son transport dans la zone. En surface, les courants agissent sur la dilution.

Dans les autres cas, si  $\delta\sigma$  est inférieur à  $\delta\sigma_{\text{lim}1}$  les caractéristiques du panache en surface sont semblables à celles du cas 1 et 2. Pour des  $\delta\sigma$  plus forts, le panache est capté, mais jamais au dessous de 15 mètres à partir du fond (-30 mètres de la surface).

Sur les 5 à 10 mètres au-dessus de la côte de blocage maximum, le panache a des caractéristiques assez constantes (épaisseur = 1,5 à 4 mètres, diamètre = 5 à 15 mètres, dilution = 10 à 40).

Entre la surface et cette profondeur d'équilibre, le panache a une épaisseur très faible ( $< 1$  mètre) et un diamètre plus fort (15 - 30 m). Cette zone de transition correspond :

- soit à la partie, entre les deux limites  $\delta\sigma_{\text{lim}1}$  et  $\delta\sigma_{\text{lim}2}$
- soit à des situations où le courant dans le milieu est fort et entraîne le panache sur l'horizontale sans qu'il se développe sur la verticale.

Ces résultats ont été calculés avec un débit moyen de  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lorsque le débit varie, dans la journée et en période de pluie, ces  $\delta\sigma_{\text{lim}}$  se modifient, elles augmentent avec le débit.

tableau T2

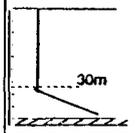
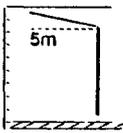
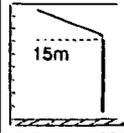
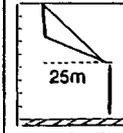
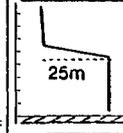
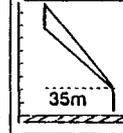
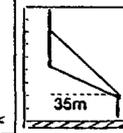
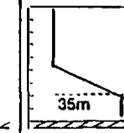
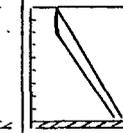
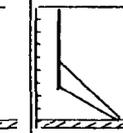
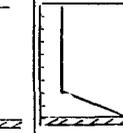
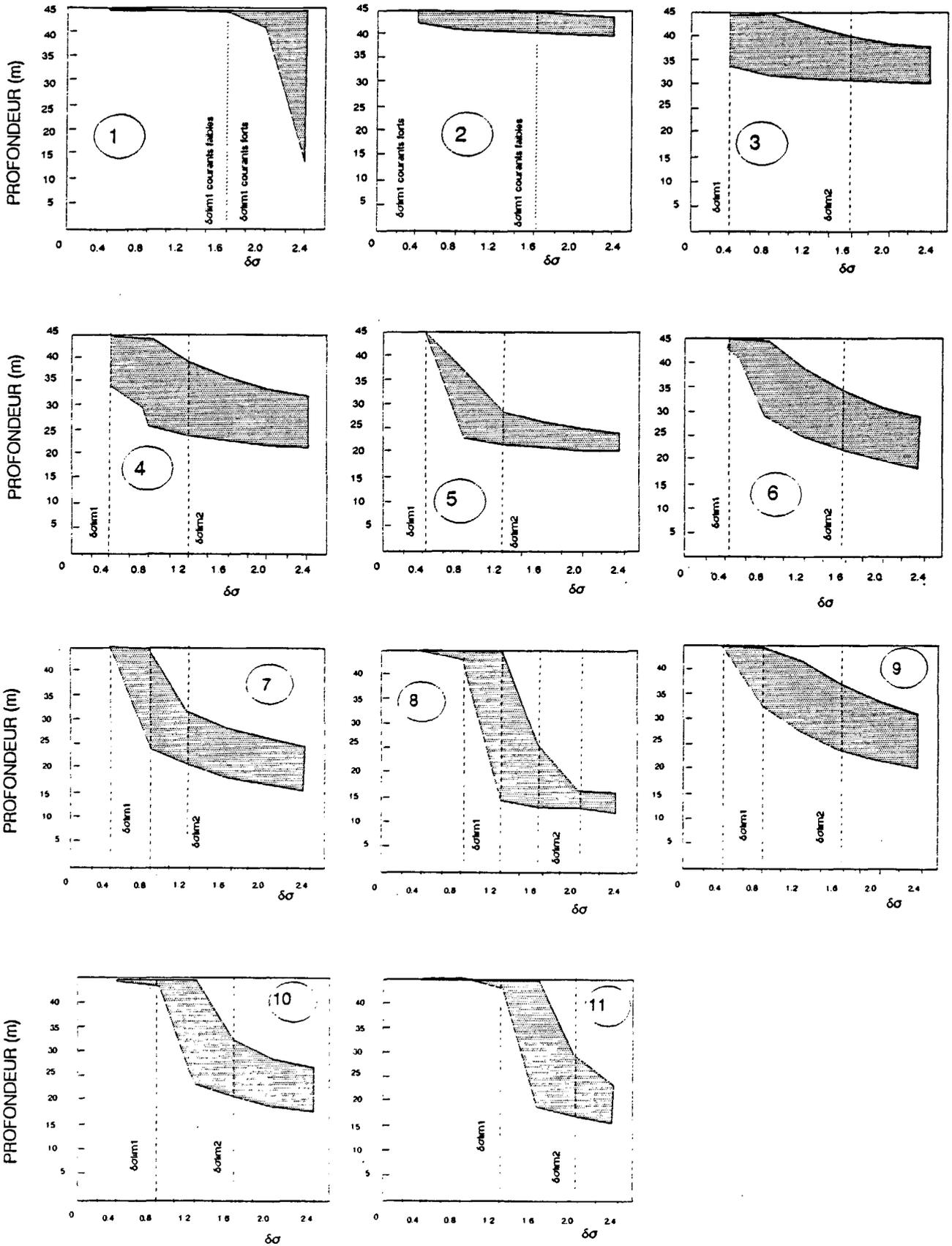
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
	<p>HOMOGENE ou THERMOCLINE SOUS 30m avec <math>\delta\sigma &gt; 1,6</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 5m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,4-1,6</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,6</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 15m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,4-0,8</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,6</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 25m e &gt; 10m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,4-0,6</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,2</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 25m e &lt; 10m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim2} = 0,4</math> <math>\delta\sigma_{lim1} = 1,2</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 35m e &gt; 25m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim2} = 0,4</math> <math>\delta\sigma_{lim1} = 1,6</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 35m 15m &lt; e &lt; 25m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,4-0,8</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,2</math></p> 	<p>STRATIFIE au dessus de 35m e &lt; 15m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,8-1,2</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,8-2</math></p> 	<p>STRATIFIE PARTANT DU FOND ep &gt; 35m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,4-0,8</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,2-1,8</math></p> 	<p>STRATIFIE PARTANT DU FOND 25m ≤ e ≤ 35m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 0,8-1,2</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,2-1,8</math></p> 	<p>STRATIFIE PARTANT DU FOND 15m ≤ e ≤ 25m</p> <p><math>\delta\sigma_{lim1} = 1,2-1,4</math> <math>\delta\sigma_{lim2} = 1,8-2,0</math></p> 	<p>STRATIFIE PARTANT DU FOND e &lt; 15m</p> <p><math>\delta\sigma &gt; 1,6</math></p> 	
45m	ep=2,5 à 4m diam=10 à 30m dil=40 à 120	ep=1 à 4m diam=12 à 18m dil=40 à 100	ep=1 à 5m diam=15 à 30m dil=50 à 100	ep=1 à 7m diam=15 à 20m dil=50 à 110	ep=2 à 5m diam=15 à 20m dil=50 à 110	ep=1 à 10m diam=15 à 25m dil=50 à 110	ep=3 à 10m diam=14 à 30m dil=50 à 100	ep=3 à 6m diam=14 à 25m dil=50 à 110	ep=2,5 à 6m diam=14 à 20m dil=50 à 100	ep=3 à 7m diam=15 à 25m dil=35 à 110	ep=1 à 7m diam=15 à 25m dil=40 à 130	ep=1,5 à 6m diam=10 à 20m dil=40 à 120	45m
40m			ep=0 à 3m diam=20 à 30m dil=60 à 80	ep ≤ 1m diam=20 à 30m dil=40 à 60	ep ≤ 1m diam=20 à 40m dil=30 à 60	ep ≤ 1m diam=15 à 30m dil=25 à 80	ep ≤ 1m diam=15 à 20m dil=30 à 90	ep ≤ 1m diam=20 à 30m dil=30 à 100	ep ≤ 1m diam=20 à 35m dil=50 à 80	ep < 1m diam=20 à 40m dil=25 à 100	ep ≤ 1m diam=20 à 25m dil=60 à 120	ep ≤ 1m diam=15 à 20m dil=80 à 90	40m
35m			ep=2 à 2,5m diam=10 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 3,5m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	ep=2 à 4m diam=8 à 15m dil=20 à 40	35m
30m													30m
25m					ep=1,5 à 2,5m diam=5 à 15m dil=10 à 35	ep=2m diam < 10m dil=20	ep=1,5 à 3,5m diam=6 à 12m dil=15 à 30	ep=0,5 à 4m diam=3 à 10m dil=10 à 30	ep=1,5 à 4m diam=5 à 15m dil=15 à 40	ep=1,5 à 3,5m diam=6 à 15m dil=10 à 40	ep < 1m diam=18 à 25m dil=20 à 40	ep=1,5 à 3m diam=6 à 10m dil=10 à 70	25m
20m													20m
15m													15m
10m													10m

TABLEAU T2 : 12 cas types -

caractéristiques du panache en fonction de la profondeur-

Synthèse pour un rejet à 45 m et un débit de 0,20m<sup>3</sup>/s

FIGURE II.17 Profondeur de captage en fonction de la stratification  
Cas types



**CHAPITRE III**

**ANALYSE DE SENSIBILITE  
DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE  
AUX CONDITIONS DU MILIEU**

Connaissant par le modèle JET de la SOGREAH la profondeur de captage, l'épaisseur d'étalement et le débit du panache, le modèle horizontal en couches calcule ensuite le devenir du nuage ainsi formé, transporté et mélangé en fonction des courants.

La source de pollution introduite est caractérisée par un flux entrant dans une ou plusieurs mailles du modèle et sur une ou plusieurs couches.

Le nuage est soumis à des courants différents selon les couches et à une diffusion horizontale et verticale, la première étant vraisemblablement fonction du courant, la deuxième variant avec le gradient de densité et le gradient de courant.

Comme précédemment avec le "panache", le comportement du "nuage" est cette fois examiné en faisant varier les conditions du milieu, ainsi que les coefficients utilisés dans les calculs.

Les essais sont réalisés en injectant un flux égal à 200 mg/s, ce qui correspond à une débit du rejet de 0,20 m<sup>3</sup>/s (soit 720 m<sup>3</sup>/h) et une concentration dans l'effluent de 1 mg/l. Les résultats du modèle sont donnés en concentrations (mg/l), ou en dilution, équivalente à des inverses de concentration ( $C/C_0$ ), puisque  $C_0=1$ . Pour connaître la dilution réelle d'un paramètre spécifique et conservatif du rejet, on multipliera donc la dilution théorique par la concentration  $C_0$  de ce paramètre dans l'effluent.

### **III.1 FLUX INTRODUICTS PAR LE PANACHE COMME CONDITION A LA LIMITE DU MODELE.**

Nous avons vu que la dilution dans le panache à son arrivée à sa cote d'équilibre variait en fonction du courant et de la profondeur de captage. Le diamètre avant étalement  $D_1$  varie entre 5 et 40 mètres. Il est multiplié par un facteur allant de 2 à 6 dans la zone d'étalement radiale, zone de mélange très bouillonnante. On ne connaît pas la dilution résultante après cet étalement radial. Le volume étant multiplié environ 4 à 30 fois, la dilution doit être également multipliée par un facteur de cet ordre de grandeur.

La difficulté est de reproduire, par le modèle en couches, cette dilution dans la zone de mélange. On connaît le flux et l'épaisseur et on se donne les dimensions de cette zone sans recréer la courantologie locale liée à l'étalement de la tache.

Etant donné la discrétisation spatiale horizontale du modèle, l'échelle de la zone d'étalement et la diffusion horizontale, autant physique (représentée par un coefficient  $K_h$ ) que numérique (due au fort gradient dans la zone proche de l'émergence du panache), les résultats ne sont pas très sensibles à la condition limite du panache, qu'elle soit représentée par des flux répartis de façon réaliste dans un rayon de 30 à 50 mètres autour de l'émissaire, ou par un flux total concentré dans un rayon de 10 mètres.

En effet, on obtient des dilutions différentes dans la zone proche de l'émissaire, mais au delà de 50 mètres, l'écart n'excède pas 10% ; il devient nul au delà de 150 ou 200 mètres.

Dans la mesure où les résultats attendus du modèle ne se situent pas dans la zone proche du panache de remontée, c'est à dire à une distance inférieure à 100 mètres, il semble que

l'incertitude sur le calcul de la transition entre le panache vertical et l'étalement horizontal n'entraîne pas d'erreurs importantes.

La dilution calculée par le modèle en couches résultera donc du flux introduit, des courants, de la diffusion et surtout de l'épaisseur de la couche polluée. Celle-ci est donnée par le modèle JET de la SOGREAH. Sa valeur est parfois très importante lorsque l'écart de densité entre le panache arrivé en surface et le milieu est très faible, ou bien très petite (inférieure à 1 mètre) lorsque les courants sont forts et le panache peu dynamique. Ces résultats extrêmes et qui semblent peu réalistes n'ont pu être vérifiés correctement sur le terrain dans le cadre de cette étude.

### III.2 INFLUENCE DU COEFFICIENT DE DISPERSION HORIZONTALE

#### A. DEFINITION ET ORDRE DE GRANDEUR DU COEFFICIENT $K_h$

Le coefficient de diffusion horizontale  $K_h$  provient d'une approximation qui consiste à assimiler le mélange dû aux fluctuations turbulentes de la vitesse et des concentrations à une diffusion dite "turbulente", dont le flux est proportionnel au gradient horizontal de concentration. On élimine ainsi artificiellement les composantes à hautes fréquences, mais on introduit des coefficients empiriques difficiles à quantifier et semble-t-il variables avec les conditions du milieu.

Des formulations ont été proposées par un certain nombre d'auteurs notamment à partir d'analogies avec les écoulements en conduite (TAYLOR-1954), puis étendues aux écoulements à surface libre (ELDER-1959). Le coefficient est proportionnel à la hauteur d'eau et à la vitesse de frottement à la paroi.

La SOGREAH (1982) adopte une formule du même type en utilisant la force de frottement induite par le vent sur la surface libre. Les résultats sont traduits en abaques en fonction de la hauteur d'eau  $H$ , du courant moyen  $V$  et du coefficient de rugosité de STRICKLER ( $K_s$ ). Il sont exprimés également par la formule générale suivante :

$$K_h = 0,72 \cdot H^{5/6} \cdot V / K_s$$

En Méditerranée, dans les zones de rejets par émissaire, la profondeur est importante (30-40 mètres) et la côte est a priori éloignée. La dispersion horizontale est engendrée par la turbulence, qui est elle-même provoquée par le frottement du vent sur la surface et par le cisaillement des couches les unes sur les autres animées par des courants différents. La hauteur d'eau utilisée dans la formule précédente peut donc être réduite à la profondeur de la couche dans laquelle le courant est constant.

Ces formules donnent des valeurs très faibles pour le coefficient de diffusion horizontale, entre 0,0005 et 0,1  $m^2/s$ , ce maximum correspondant à un coefficient de STRICKLER de 50, un courant fort de 30 cm/s sur une hauteur d'eau de 40 mètres.

Dans le modèle en couches, les équations sont moyennées sur l'épaisseur de chacune des couches et le coefficient de diffusion est en fait un coefficient de dispersion intégrant les fluctuations de vitesse et de concentrations sur l'épaisseur. Les coefficients de dispersion introduits dans le modèle, et qui sont appelés parfois ici par abus de langage les coefficients de "diffusion", seront donc plus grands.

Dans la bibliographie, on trouve des valeurs numériques correspondant à des coefficients de dispersion mesurés expérimentalement par marquage de la tâche évoluant en surface.

En Méditerranée, ces coefficients sont de l'ordre de :

- 0,1 à 0,5 pour des courants de 3 cm/s en baie de Propriano (C.E.T.E.-1977)
- 0,3 pour des courants de 5 cm/s à Cortiou (SOGREAH-1981)

L'ordre de grandeur semble être de 0,1 à 1 m<sup>2</sup>/s, c'est-à-dire multiplié par 10 par rapport au coefficient de diffusion.

Dans le cadre de cette étude, les campagnes de mesure ont permis de vérifier les ordres de grandeur de ces coefficients. On distingue deux cas :

\* **EN SURFACE** : Le nuage est transporté dans la couche de surface soumise à un courant dû au vent et très variable en fonction de la profondeur :

. par courants faibles, inférieurs à 10 cm/s, il semble que le coefficient soit de l'ordre de 0,1 fois la vitesse (celle-ci étant exprimée en cm/s), c'est-à-dire du même ordre de grandeur que les précédentes mesures.

. au-delà, pour des courants plus forts (10 à 30 cm/s), la décroissance des concentrations est plus rapide. Elle peut être due à une augmentation importante du coefficient de dispersion horizontale mais aussi à un mélange vertical croissant dû à l'entraînement des couches sous-jacentes et à la turbulence engendrée par le frottement. La précision et le nombre des mesures sont insuffisants pour pouvoir déterminer la part de ces différents phénomènes. Le coefficient de dispersion a été augmenté arbitrairement, jusqu'à 4 m<sup>2</sup>/s pour un courant de 20 cm/s.

\* **EN PROFONDEUR** : Le nuage est bloqué dans des couches profondes, soumises à des courants faibles et probablement peu variables sur la profondeur; la "dispersion" est donc plus faible :

. la vitesse du courant étant de l'ordre de 1 à 3 cm/s, le coefficient de dispersion prend des valeurs proches du coefficient de diffusion turbulente. Pour l'application du modèle aux campagnes de mesures, nous avons utilisé des coefficients inférieurs à 0,1 m<sup>2</sup>/s.

## B. EFFET DE LA VARIATION DU COEFFICIENT $K_h$ SUR LES DILUTIONS DANS LE NUAGE

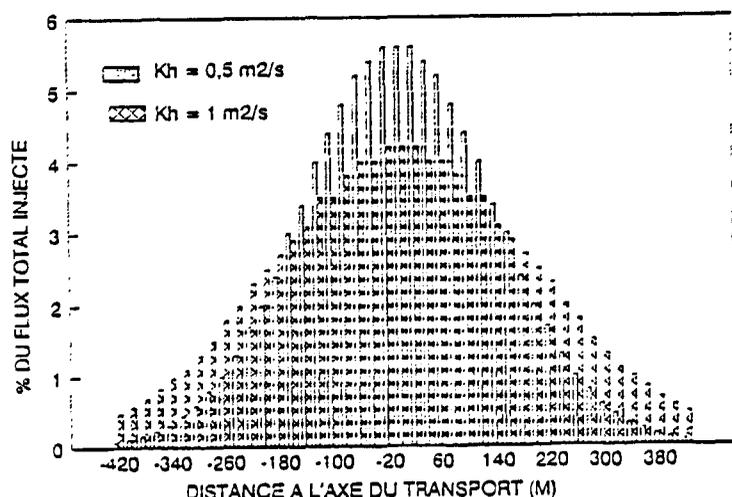
En augmentant le coefficient  $K_h$ , les concentrations maximales sur l'axe principal du nuage diminuent puisque l'étalement horizontal est plus important. La dilution est multipliée par 1,5 si le coefficient de diffusion horizontal est multiplié par 2; par 1,25 s'il est multiplié par 1,5.

L'augmentation de la dilution s'exprime par un accroissement de la largeur de la tâche plutôt que par un accroissement de sa longueur. Le coefficient de dispersion horizontale agit donc plus sur la diffusion transversale.

A l'état stationnaire, la largeur de la tâche, limitée par exemple par une dilution de  $10+04$ , augmente avec  $K_h$  d'autant plus fortement que les courants sont faibles. Si on multiplie  $K_h$  par 2, elle augmente d'environ 300 mètres pour un courant faible (2 à 5 cm/s), et de 200 à 250 mètres pour un courant fort (10 à 20 cm/s).

La figure III.2 montre la distribution du nuage, (exprimée en pourcentage du flux total introduit dans le milieu) le long d'une coupe transversale, à 1 000 mètres de distance du rejet, pour deux coefficients de dispersion et un courant horizontal de 5 cm/s.

**Figure III.2**  
COUPE TRANSVERSALE A 1000 METRES  
Courant = 5 cm/s



### III.3 INFLUENCE DU COURANT HORIZONTAL DANS LES COUCHES

En négligeant pour ces premiers essais, l'interaction verticale entre les couches, plusieurs courants ont été testés afin de déterminer d'une part le temps nécessaire pour qu'un état stationnaire soit atteint dans un rayon de 1 500 à 2 000 mètres autour de la sortie de l'émissaire et d'autre part les dilutions en fonction de la distance au rejet.

Les coefficients de dispersion horizontale utilisés ici sont ceux qui seront utilisés dans l'application du modèle aux campagnes de mesures en milieu homogène.

Les conditions initiales sont données par un champ de concentrations nulles partout, correspondant à un polluant quelconque conservatif.

#### A. TEMPS POUR ARRIVER A L'ETAT STATIONNAIRE (*figure III.3*)

Pour un courant fort supérieur à 10 cm/s, l'état stationnaire est atteint au bout de 6 heures de simulation.

Avec des courants plus faibles (5 cm/s), l'état stationnaire n'est atteint qu'au bout de 12-14 heures au-delà de 1,5 km, mais il est atteint au bout de 8 heures à une distance inférieure à 1 km.

Si le courant est presque nul, de l'ordre du cm/s, l'étalement de la tache se fait surtout par dispersion horizontale et les concentrations augmentent régulièrement dans la zone, même proche. Il faut attendre 12 heures à 500 mètres, 20 heures à 1 km pour qu'elles restent constantes. La vitesse de progression du front aval dépend de la valeur du coefficient de dispersion horizontale.

#### B. ETALEMENT DU NUAGE

Etant donné le temps relativement long pour atteindre l'état stationnaire, les distances limites à partir desquelles une dilution donnée est atteinte seront différentes si on regarde les résultats au bout de 4 heures par exemple ou au bout de 24 heures. La variabilité des courants en mer font que l'état stationnaire est rarement atteint dans la réalité.

Au bout de 4 et 20 heures, les profils longitudinaux dans l'axe du courant montrent les dilutions pour quatre cas de vitesse. (*figure III.4*)

Par courant très faible (2 cm/s), les concentrations sont les plus fortes, mais le front avance lentement en fonction du temps : au bout de 20 heures, la dilution n'est que de 100 à 300 mètres du rejet, mais le bord du front n'est pas encore arrivé à 1800 mètres de distance.

Par courant faible (5 cm/s), le gradient de concentration est établi dès 4 heures sur la distance de 500m. La dilution est plus forte.

Par courant moyen (10 cm/s), la dilution 100 est atteinte dès la zone de mélange du panache. Lorsque le courant est fort, supérieur à 15-20 cm/s, la dilution 1000 est atteinte dès les premiers 250 mètres.

Le tableau T10 présente les distances à partir desquelles les dilutions  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$  sont atteintes, au bout de 3h et 24 heures.

La *figure III.5* montre l'étalement du nuage, en coupe horizontales pour les différents cas de courants et deux cas de diffusion horizontale. La largeur L de la tache est indiquée pour chaque cas au bout de 4 heures et au bout de 20 heures de simulation.

FIGURE III.3 :

CONCENTRATIONS EN FONCTION DU TEMPS  
EN PLUSIEURS POINTS EN AVAL DU REJET;  
POUR DIFFERENTS COURANTS HORIZONTAUX  
(pas d'interaction entre les couches)

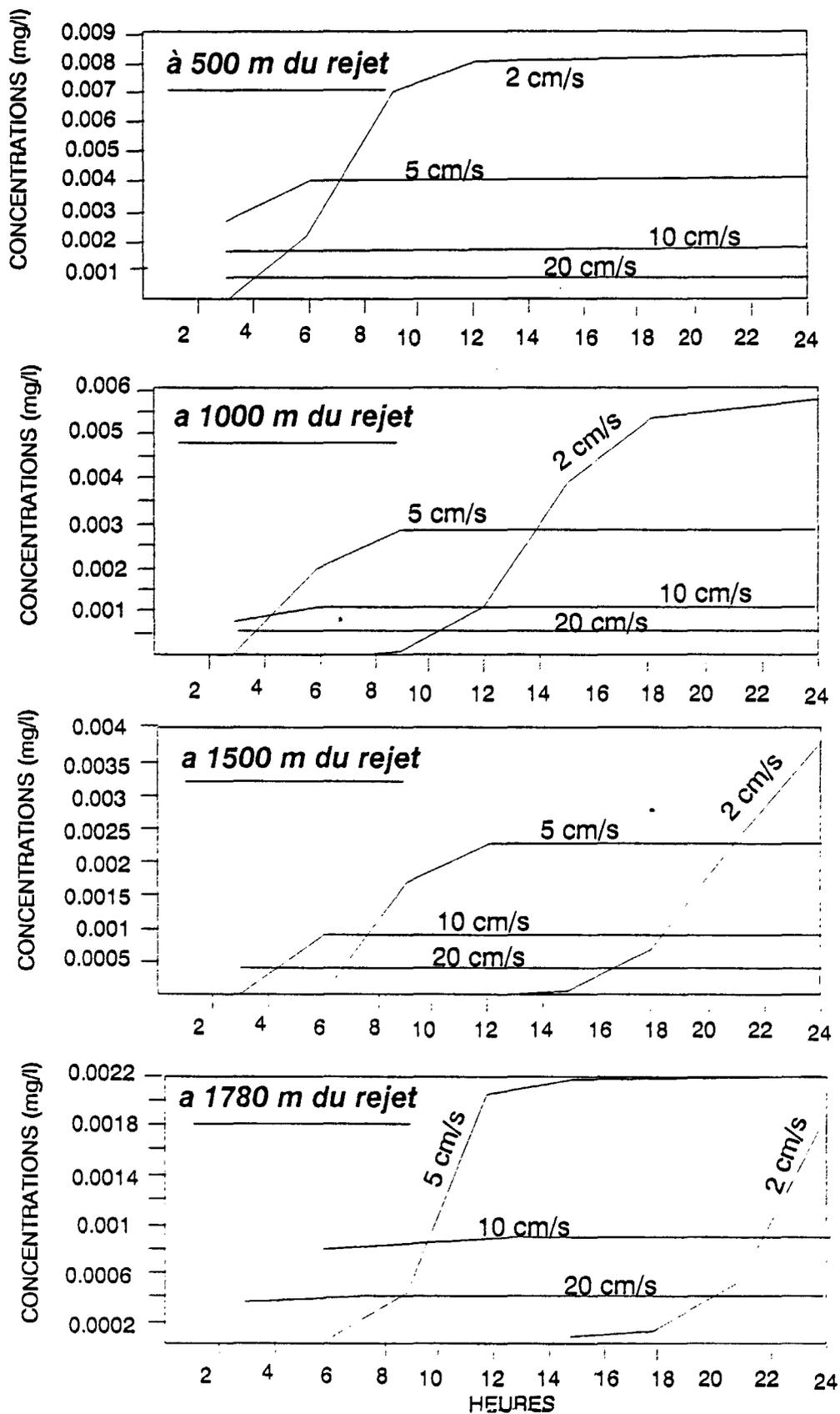


FIGURE III.4 PROFILS LONGITUDINAUX DES CONCENTRATIONS  
 A PARTIR DU REJET. POUR DIFFERENTES VALEURS DE COURANTS  
 APRES 4 et 20 HEURES DE SIMULATION  
 (pas d'interaction entre les couches)  
 Flux=200mg/s dz=4m

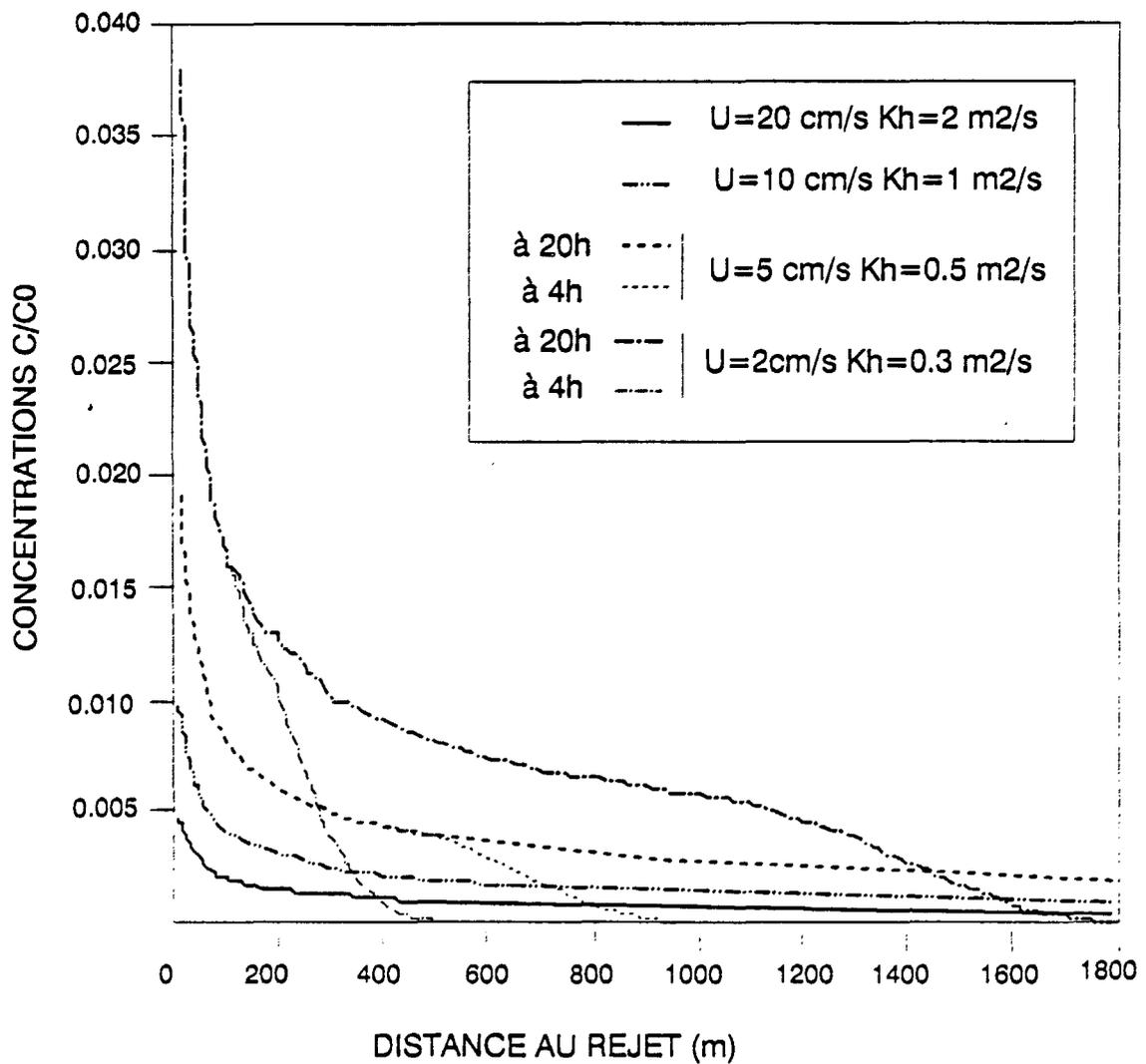


TABLEAU T10

COURANTS				
	2 cm/s	5 cm/s	10 cm/s	20 cm/s
DILUTIONS	DISTANCES	ATTEINTES	AU BOUT DE	3 HEURES
100	161 m	80 m		
1000	320 m	600 m	900 m	240m
10000	402 m	740 m	1302 m	> 2km
DILUTIONS	DISTANCES	ATTEINTES	AU BOUT DE	24 HEURES
100	320 m	80 m		
1000	> 2 km	> 2 km	1260 m	240m
10000	> 2 km	> 2 km	> 2 km	> 2km

TABLEAU T11

COURANTS									
		2 cm/s		5 cm/s		10 cm/s		20 cm/s	
$K_h =$		0.3 m <sup>2</sup> /s		0.5 m <sup>2</sup> /s		1 m <sup>2</sup> /s		2 m <sup>2</sup> /s	
$C_1/C_0$	$C_0/C_1$	0,059	17	0,030	33	0,015	67	0,0083	120
$C_3/C_0$	$C_0/C_3$	0,013	77	0,0063	159	0,0032	312	0,0016	625
$K_h =$		0.6 m <sup>2</sup> /s		1 m <sup>2</sup> /s		2 m <sup>2</sup> /s		4 m <sup>2</sup> /s	
$C_1/C_0$	$C_0/C_1$	0,039	26	0,021	48	0,011	91	0,0063	159
$C_3/C_0$	$C_0/C_3$	0,0088	114	0,0044	227	0,0022	454	0,0011	909

$C_0$  : concentration dans l'effluent  
 $C_1$  : concentration en surface au droit de l'émissaire  
 $C_3$  : concentration à 200 mètres de l'émissaire

TABLEAU T12

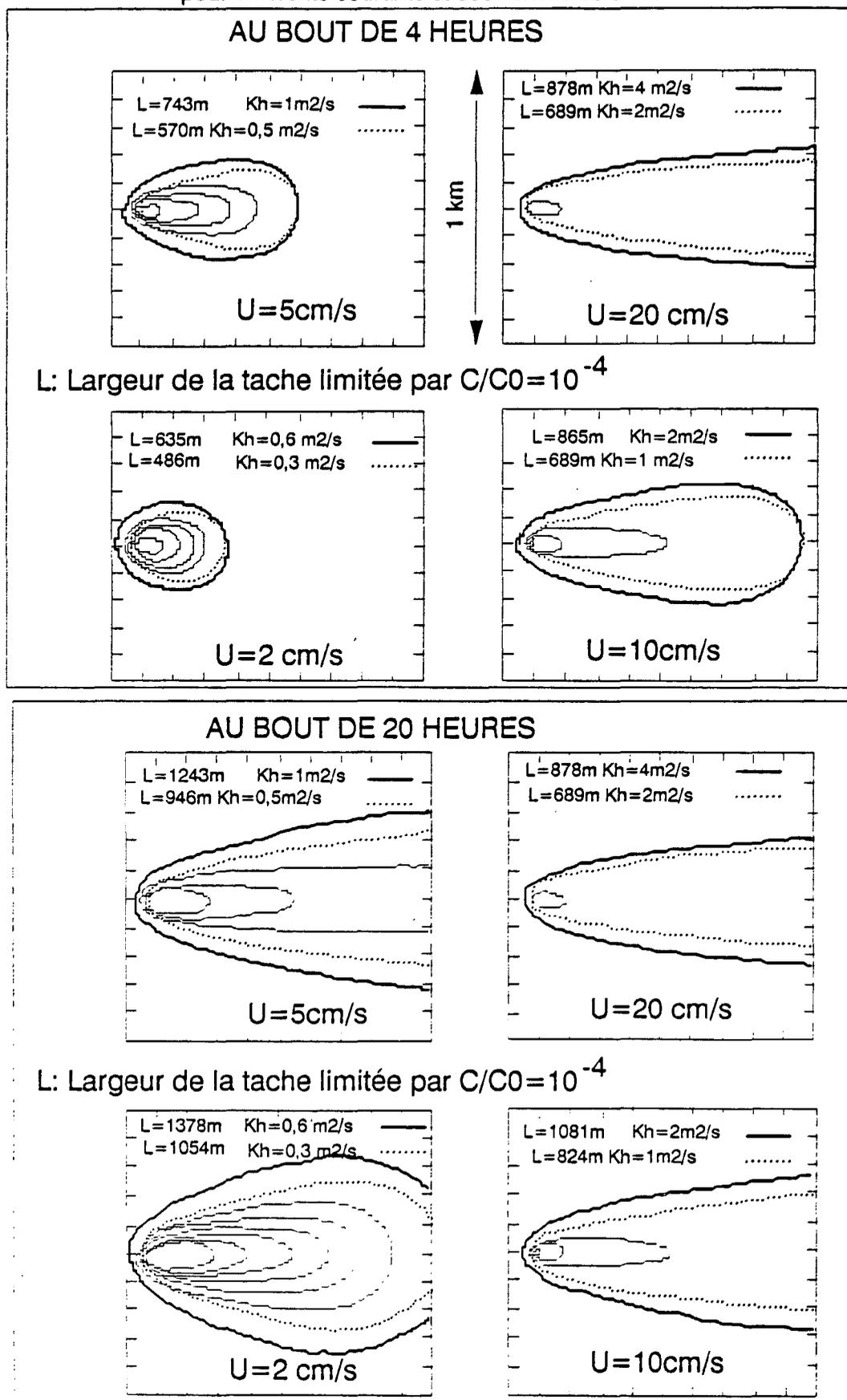
	$k_{dil}$ (m <sup>-1</sup> )	$q_{200}$	$D_{10}$ (m)
0-200m	0,30.10 <sup>-02</sup>	3,98	333
200-600m	0,58.10 <sup>-03</sup>	1,31	1724
600-1000m	0,28.10 <sup>-03</sup>	1,14	3571
1000-1800m	0,16.10 <sup>-03</sup>	1,07	6250
200-1000m	0,40.10 <sup>-03</sup>	1,20	2500
200-1800m	0,26.10 <sup>-03</sup>	1,13	3846

$k_{dil}$ : coefficient de dilution en fonction de la distance  
 $q_{200}$ : taux de décroissance tous les 200 mètres

$$C = C_1/q_{200} \text{ quand } x-x_1=200m \Rightarrow q_{200} = 10 k_{dil}.200$$

$D_{10}$  : distance pour que la concentration soit divisée par 10  
 $D_{10} = 1/k_{dil}$

FIGURE III.5 Coupes horizontales du nuage  
pour différents courants et coefficients de diffusion horizontale



Hormis la zone proche du rejet, la dilution augmente très lentement en fonction de la distance. On observe une forte variabilité des dilutions en fonction du courant et du temps, le premier paramètre étant éminemment variable en fonction du second, notamment en Méditerranée.

Si on trace en logarithme décimal le profil longitudinal des concentrations (*figure III.6*) pour les différents courants et deux coefficients de dispersion horizontale, on observe, à partir de 200 ou 400 mètres, des droites dont la pente est la même quel que soit le courant et le coefficient  $K_h$ .

La décroissance des concentrations en fonction de la distance est donc égale quel que soit le courant, mais le niveau de dilution est différent. Le tableau T11 donne les dilutions obtenues au centre du panache et à 200 mètres en aval.

Le tableau T12 indique les pentes  $k_{dil}$  permettant de connaître l'augmentation de la dilution au fur et à mesure que l'on s'éloigne du rejet.

$$C(x) = C_1 \cdot 10^{k_{dil} \cdot (x-x_1)}$$

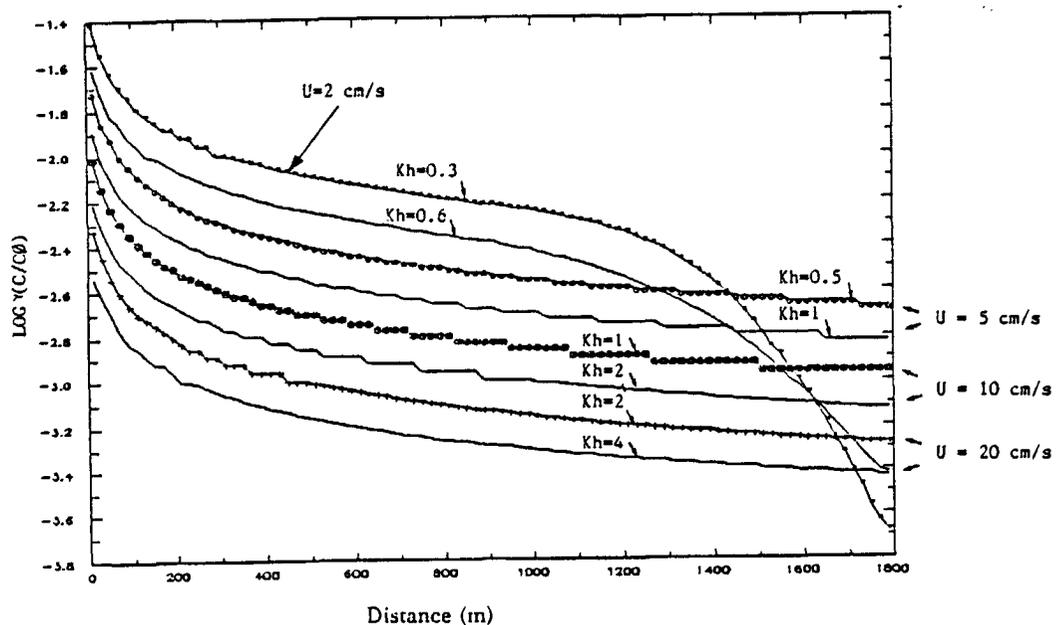
Dans les premiers 200 mètres, la concentration est divisée par 3, puis jusqu'à 600 mètres, elle est divisée par 1,3 tous les 200 mètres, et enfin au-delà de 600 mètres, elle n'est plus divisée que par 1,1 tous les 200 mètres.

En terme de flux, et si l'on a atteint l'état stationnaire quel que soit le courant, on obtient les mêmes flux sortant de la zone d'étude quel que soit le courant. En effet, à l'état stationnaire, tout ce qui rentre par le rejet est égal à ce qui sort des limites de la zone. Une augmentation de courant, donc de débit, est compensée par une diminution de la concentration.

La limite donnée par la dilution  $10^4$  est éloignée à plus de 2 km en régime stationnaire mais rappelons que dans ces essais, aucun échange vertical n'a été pris en compte et une dilution supplémentaire doit être introduite par diffusion verticale entre les couches. Par ailleurs, l'état stationnaire est rarement atteint.

Figure III.6

PROFILS LONGITUDINAUX DES CONCENTRATIONS EN LOG. 10  
POUR DIFFERENTS COURANTS ET COEFFICIENTS DE DIFFUSION HORIZONTALE



### III.4 ECHANGES VERTICAUX ENTRE LES COUCHES

#### III.4.1. Diffusion verticale

Comme pour les échanges par diffusion horizontale, les échanges verticaux sont exprimés à partir d'un coefficient de diffusion verticale. Le flux de concentration échangé est proportionnel à ce coefficient multiplié par le gradient vertical de concentration.

Ce paramètre empirique dépend du profil de vitesse et il varie avec la profondeur. D'autre part, les stratifications densimétriques, en inhibant la turbulence, stabilisent le milieu et diminuent les échanges verticaux.

Le coefficient de diffusion verticale est donc d'abord fonction de la profondeur et de la vitesse de frottement. Quelques relations ont été proposées (SALOMON *et al* 1980):

$$K_z = K \cdot z \cdot V^* \cdot (1 - z/H)$$

ou

$$K_z = K \cdot H/3 \cdot V^* \sqrt{(1-z/H)} (1-(1-z/H)^3)$$

Ou d'après la SOGREA (1982), à partir de la force de frottement induite par le vent en surface libre :

$$K_z = 0,067 \cdot H \cdot \sqrt{gHj} = 0,21 \cdot H^{5/6} z / K$$

En présence d'un gradient vertical de densité, cette valeur est ensuite corrigée par un facteur multiplicatif faisant intervenir le quotient du taux de variation d'énergie potentielle par celui de la dissipation d'énergie turbulente. Ce facteur est le nombre de RICHARDSON ; il s'écrit :

$$Ri = \frac{g \cdot \rho_0 / dz}{\rho_0 (du/dz)^2}$$

Il est plus souvent utilisé sous sa forme globale où il est fonction des caractéristiques moyennes de l'écoulement plutôt que des gradients locaux. En effet, le gradient de vitesse est difficile à connaître par la mesure et même par le modèle d'autant plus que celui-ci donne des valeurs moyennes sur chacune des couches. D'autre part, lorsque le gradient de courant est nul, le mélange est encore turbulent. Le nombre de RICHARDSON global s'écrit donc de la façon suivante :

$$Ri_g = \frac{g \cdot H \cdot \Delta \rho_c}{U^2 \cdot \rho_0}$$

U étant la valeur moyenne du courant sur l'écoulement dans la couche  
 $\Delta \rho_c$  étant la différence de densité entre les deux frontières

Pour relier le coefficient de diffusion verticale et ce nombre de RICHARDSON, SALOMON (1980) propose des expressions de la forme :

$$K_z = K_0 + K_1 \cdot (1 + a \cdot Ri_g)^b$$

avec les ordres de grandeur suivants:

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ b &= -1,75 \end{aligned}$$

Le coefficient de diffusion verticale varie donc entre les deux valeurs extrêmes  $K_0$  et  $K_1$  en fonction de la stratification  $D\rho_c$  et du courant. C'est la formulation qui a été choisie dans cette étude.

Lorsque le courant dans la couche profonde est faible, la diffusion verticale est plus sensible à la stratification que lorsque le courant est fort. Si le courant est faible dans les deux couches, la turbulence due au courant ne permet pas de compenser le barrage dû à une stratification même légère ; le coefficient  $K_z$  est minimum (= à  $K_0$ ), même pour un  $D\rho_c$  petit. Au contraire, lorsque le courant est fort, même une forte stratification n'empêche pas la diffusion verticale.

Les tests qui suivent ont été réalisés en prenant un nuage arrivant en surface, d'épaisseur  $E_p$  égale à 4 mètres. Le flux total injecté est égal à 200 mg/s et le courant est constant sur la profondeur (10 cm/s ;  $K_h = 1\text{m}^2/\text{s}$ ). Six couches représentent une profondeur de 16 mètres; les quatre couches de surface ayant une épaisseur de 2 mètres chacune, les deux couches du fond ayant une épaisseur de 4 mètres chacune.

Plusieurs valeurs du coefficient  $K_z$  ont été testées, partant d'une valeur très faible ( $0,3 \cdot 10^{-4}$ ) et en la multipliant successivement par 10, 20, 50 et 100, la valeur maximale étant celle proposée par la SOGREAH (300 cm<sup>2</sup>/s). Le tableau T13 résume les résultats en terme de concentration ( $C/C_0$ ) et de dilution ( $C_0/C$ ) avec  $C_0 = 1$ .

Au dessous du nuage initial, la couche d'eau reçoit une partie de l'effluent, d'autant plus rapidement que  $K_z$  est fort (dans les 200 ou 300 premiers mètres). Il se dilue ensuite lentement par mélange et transport.

Parallèlement, dans les deux couches de surface où le panache est capté, l'augmentation des échanges verticaux provoque une décroissance plus rapide des concentrations. A 100 mètres, l'augmentation du coefficient  $K_z$  n'entraîne pas de différence importante, mais à 1 km de distance, on observe un profil vertical très étalé si  $K_z$  est maximum alors que le gradient reste fort si  $K_z$  est faible.

Le tableau T14 donne les valeurs du taux de décroissance  $K_{dil}$  en fonction de la distance dans les couches de surface 0-2m et 2-4m. La concentration est divisée par  $q_{200}$  tous les 200 mètres.

#### III.4.2. Vitesse verticale de chute

L'effluent urbain est chargé en matières organiques particulières avec des vitesses de chute faibles dont les valeurs sont difficiles à mesurer ou à trouver dans la littérature.

En effet, la matière organique a une densité d'environ 1,2 à 1,3 tandis qu'on utilise plus généralement dans les calculs et les expériences des matières minérales du type quartz qui ont une densité double.

D'autre part, la matière organique d'un effluent urbain se présente sous forme de floccs ou de colloïdes. Au contact de l'électrolyte que constitue l'eau de mer, les colloïdes sont soumis à des phénomènes de floculation. Le produit flocculant introduit pendant le traitement physicochimique à la station d'épuration est susceptible d'induire par ailleurs une post floculation dans le milieu. Les floccs se cassent ou se réagrègent selon différents processus qui sont difficiles à appréhender dans le milieu. La mesure de la granulométrie par le COULTER est par ailleurs rendue délicate car elle introduit de nouveaux facteurs qui perturbent les floccs en les cassant (choc électrique), et qui développent un phénomène de coagulation responsable de l'apparition de nouvelles particules (LOARER 1991).

J.W.LAVELLE *et al* (1988) ont étudié les boues sortant des stations d'épuration. Les très grosses particules (diamètre > 63  $\mu\text{m}$ ) ne sont pas soumises à la floculation, elles ont des vitesses de chute de l'ordre de 1 mm/s, jusqu'à plus de 1 cm/s pour celles qui ont un diamètre supérieur à 250  $\mu\text{m}$ . Les autres particules qui constituent la majorité de l'effluent sont fines et ont une vitesse de chute moyenne de l'ordre de 0,01 mm/s, ou même plus faible.

TABLEAU T13

Couche de surface 0 - 2 mètres

COEFFICIENTS DE DIFFUSION VERTICALE $K_z$ ( $m^2/s$ )						
	0.	0,00003	0,0003	0,0006	0,0015	0,003
$C_1/C_0$ $C_3/C_0$	0,015 0,0032	0,015 0,0032	0,015 0,0031	0,015 0,0031	0,015 0,0028	0,015 0,0024
$C_0/C_1$ $C_0/C_3$	67 312	67 312	67 322	67 322	67 357	67 417

Couche de surface 2 - 4 mètres

COEFFICIENTS DE DIFFUSION VERTICALE $K_z$ ( $m^2/s$ )						
	0.	0,00003	0,0003	0,0006	0,0015	0,003
$C_1/C_0$ $C_3/C_0$	0,015 0,0032	0,015 0,0031	0,015 0,0028	0,015 0,0025	0,014 0,0022	0,014 0,0019
$C_0/C_1$ $C_0/C_3$	67 312	67 322	67 357	67 400	71 454	71 526

$C_0$  : concentration dans l'effluent = 1 mg/l  
 $C_1$  : concentration en surface au droit de l'émissaire  
 $C_3$  : concentration à 200 mètres de l'émissaire

Couches inférieures

COEFFICIENTS DE DIFFUSION VERTICALE $K_z$ ( $m^2/s$ )						
	0.	0,00003	0,0003	0,0006	0,0015	0,003
COUCHE	INTERMED	4-6 m				
$C_{MAX}$ $D_{LMAX}$ $D_{iC_{MAX}}$	0 0 0	$0,9 \cdot 10^{-4}$ 11111. à 1000m	$0,5 \cdot 10^{-3}$ 2000 460-820m	$0,6 \cdot 10^{-3}$ 1667 240-400m	0,0010 1000 60-180m	0,0015 667 40-60m
COUCHE	INTERMED	6-8 m				
$C_{MAX}$ $D_{LMAX}$ $D_{iC_{MAX}}$	0 0 0	$0,3 \cdot 10^{-5}$ $294 \cdot 10^3$ à 1000m	$0,1 \cdot 10^{-3}$ 7143 > 900 m	$0,3 \cdot 10^{-3}$ 3846 > 800 m	$0,4 \cdot 10^{-3}$ 2325 440-620m	$0,6 \cdot 10^{-3}$ 1639 260 m
COUCHE	INTERMED	8-12m				
$C_{MAX}$ $D_{LMAX}$ $D_{iC_{MAX}}$	0 0 0	$0,2 \cdot 10^{-7}$ $400 \cdot 10^5$ > 960m	$0,1 \cdot 10^{-4}$ $77 \cdot 10^3$ > 940 m	$0,5 \cdot 10^{-4}$ 19231 > 960 m	$0,2 \cdot 10^{-3}$ 5882 > 900 m	$0,3 \cdot 10^{-3}$ 3704 > 700 m

$C_{max}$  : concentration maximale sur le profil longitudinal  
 $D_L$  max : dilution minimale atteinte =  $1/C_{MAX}$   
 $D_{iC_{MAX}}$  : distance où cette concentration maximale est atteinte

TABLEAU T14

Couche de surface 0-2m

COEFFICIENTS DE DIFFUSION VERTICALE Kz						
	0.	0,00003	0,0003	0,0006	0,0015	0,003
Coefficient de dilution K <sub>dil</sub>						
0-200m	0,0030	0,0030	0,0030	0,0031	0,0033	0,0036
200-600m	0,00058	0,00058	0,00064	0,00072	0,00090	0,00100
600-1000	0,00028	0,00029	0,00032	0,00039	0,00048	0,00050
200-1000	0,00040	0,00041	0,00046	0,00054	0,00067	0,00073
Taux de décroissance q <sub>200</sub> en 200 mètres de distance						
0-200m	3,98	3,98	3,98	4,17	4,57	5,25
200-600m	1,31	1,31	1,34	1,39	1,51	1,58
600-1000	1,14	1,14	1,16	1,20	1,25	1,26
200-1000	1,20	1,21	1,23	1,28	1,36	1,40
Distance pour que la dilution soit divisée par 10						
0-200m	333 m	333 m	333 m	322 m	303 m	278 m
200-600m	1724m	1724m	1562m	1389m	1111m	1000m
600-1000	3571m	3448m	3125m	2564m	2083m	2000m
200-1000	2500m	2439m	2174m	1852m	1492m	1370m

Couche de surface 2-4m

COEFFICIENTS DE DIFFUSION VERTICALE Kz						
	0.	0,00003	0,0003	0,0006	0,0015	0,003
Coefficient de dilution K <sub>dil</sub>						
0-200m	0,0030	0,0030	0,0033	0,0035	0,0037	0,0039
200-600m	0,00058	0,00061	0,00075	0,00077	0,00080	0,00089
600-1000	0,00028	0,00031	0,00038	0,00038	0,00042	0,00047
200-1000	0,00040	0,00044	0,00054	0,00055	0,00058	0,00066
Taux de décroissance q <sub>200</sub> en 200 mètres de distance						
0-200m	3,98	3,98	4,57	5,01	5,49	6,02
200-600m	1,31	1,32	1,41	1,42	1,44	1,51
600-1000	1,14	1,15	1,19	1,19	1,21	1,24
200-1000	1,20	1,22	1,28	1,29	1,31	1,35
Distance pour que la dilution soit divisée par 10						
0-200m	333 m	333 m	303 m	286 m	270 m	256 m
200-600m	1724m	1639m	1333 m	1299m	1250m	1123m
600-1000	3571m	3226m	2631 m	2631m	2381m	2128m
200-1000	2500m	2273m	1852 m	1818m	1724m	1515m

Des tests sur le modèle ont été réalisés pour montrer l'effet des vitesses de chute, égales à 0,03 mm/s; 0,3 mm/s et 1 mm/s pour deux valeurs du coefficient de diffusion verticale ( $K_z = 0,3 \cdot 10^{-2}$  fort et  $K_z = 0,3 \cdot 10^{-4}$  faible) et un courant constant sur toute la colonne d'eau égal à 10 cm/s.

Un exemple de profil vertical est présenté sur la *figure III.7*, à 800 mètres du rejet.

Le tableau T15 donne les valeurs des dilutions au droit du rejet et à 200 mètres dans les deux couches de surface, et les dilutions maximales atteintes dans les couches inférieures.

Lorsque le coefficient de diffusion verticale  $K_z$  est fort,  $q_{200}$  varie relativement peu quand  $w_c$  augmente; par contre, lorsque le coefficient  $K_z$  est faible, la vitesse verticale fait descendre le nuage de façon plus brutale (tableau T16)

Les mesures de matières en suspension dans l'effluent de TOULON-EST ont montré (LOARER-1991) que les particules de matière organique étaient en général de petites dimensions. Leurs vitesses de chute se tiendraient plutôt dans la fourchette de valeurs inférieures à 0,1 mm/s.

L'association des deux phénomènes que sont la chute des particules et leur floculation a été étudiée par un certain nombre d'auteurs qui ont fait des mesures en fonction notamment de la turbulence du milieu. Des lois de décroissance de la concentration par sédimentation des particules ont été dégagées. Elles sont du deuxième ordre et seront testées dans le chapitre III.7 présenté plus loin et traitant de paramètres non conservatifs.

FIGURE III.7 : PROFILS VERTICAUX DES CONCENTRATIONS A 800 METRES DU REJET  
POUR DIFFERENTES VALEURS DE LA VITESSE DE CHUTE

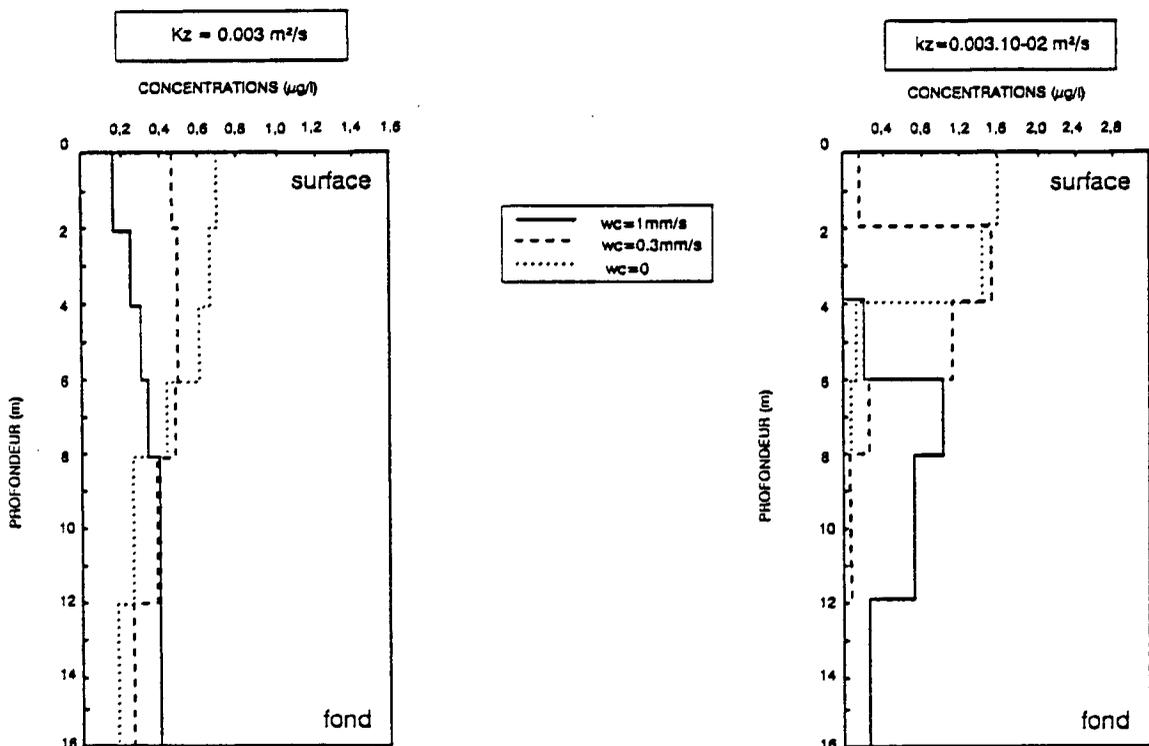


TABLEAU T16

Couche de surface 0 - 2 m

VITESSES DE CHUTE								
	Kz = 0,003 10 <sup>-2</sup>				Kz = 0,003			
	0.	0,03	0,3	1 mm/s	0	0,03	0,3	1 mm/s
Taux de décroissance q <sub>200</sub> en 200 mètres de distance								
1	3,98	4,17	5,75	21,9	5,25	5,49	6,31	9,12
2	1,31	1,35	2,19	24	1,58	1,58	1,74	2,19
3	1,14	1,17	25,12	41,7	1,26	1,28	1,34	1,58
MOY	1,21	1,41	5,01	41,7	1,40	1,25	1,50	1,82
Distance pour que la dilution soit divisée par 10								
1	333 m	322 m	263m	149m	278 m	270 m	250 m	208 m
2	1724m	1534m	588m	145m	1000m	1000m	833 m	588 m
3	3448m	2933m	143m	123m	2000m	2000m	1666m	1000m
MOY	2439m	1333m	286m	123m	1370m	2083m	1333m	769 m

1 : entre 0 et 200 mètres  
 2 : entre 200 et 600 mètres  
 3 : entre 600 et 1000 mètres  
 MOY : entre 200 et 1000 mètres

Couche de surface 2 - 4 m

VITESSES DE CHUTE								
	Kz = 0,003 10 <sup>-2</sup>				Kz = 0,003			
	0.	0,03	0,3	1 mm/s	0	0,03	0,3	1 mm/s
Taux de décroissance q <sub>d</sub> en 200 mètres de distance								
1	3,98	3,98	3,63	3,80	6,02	6,02	6,31	7,24
2	1,32	1,32	1,31	5,75	1,51	1,52	1,58	1,99
3	1,15	1,15	1,25	45,7	1,24	1,25	1,32	1,56
MOY	1,22	1,21	1,28	28,8	1,35	1,36	1,44	1,74
Distance pour que la dilution soit divisée par 10								
1	333 m	333 m	357 m	345 m	256 m	256 m	250 m	232 m
2	1667m	1667m	1695m	2631m	1124m	1100m	1000m	667 m
3	3226m	3226m	2041m	120 m	2128m	2064m	1667m	1000m
MOY	2273m	2381m	1887m	137 m	1515m	1498m	1250m	833 m

TABLEAU T15

Couche de surface 0-2m

VITESSES DE CHUTE								
	Kz = 0,003 10 <sup>-2</sup>				Kz = 0,003			
	0.	0,03	0,3	1 mm/s	0	0,03	0,3	1 mm/s
C <sub>1</sub> /C <sub>0</sub>	0,015	0,015	0,015	0,014	0,015	0,015	0,015	0,014
C <sub>3</sub> /C <sub>0</sub>	0,0032	0,0031	0,0022	0,0005	0,0024	0,0023	0,0020	0,0013
C <sub>0</sub> /C <sub>1</sub>	67	67	67	71	67	67	67	71
C <sub>0</sub> /C <sub>3</sub>	312	322	454	1923	417	435	500	769

Couche de surface 2-4m

VITESSES DE CHUTE								
	Kz = 0,003 10 <sup>-2</sup>				Kz = 0,003			
	0.	0,03	0,3	1 mm/s	0	0,03	0,3	1 mm/s
C <sub>1</sub> /C <sub>0</sub>	0,015	0,015	0,015	0,016	0,014	0,014	0,014	0,014
C <sub>3</sub> /C <sub>0</sub>	0,0031	0,0032	0,0035	0,0034	0,0019	0,0019	0,0018	0,0016
C <sub>0</sub> /C <sub>1</sub>	67	67	67	62	71	71	71	71
C <sub>0</sub> /C <sub>3</sub>	322	312	286	294	526	526	555	625

C<sub>0</sub> : concentration dans l'effluent = 1 mg/l  
 C<sub>1</sub> : concentration en surface au droit de l'émissaire  
 C<sub>3</sub> : concentration à 200 mètres de l'émissaire

Couches inférieures

VITESSES DE CHUTE								
	Kz = 0,003 10 <sup>-2</sup>				Kz = 0,003			
	0.	0,03	0,3	1 mm/s	0	0,03	0,3	1 mm/s
COUCHE INTERMEDIAIRE 4-6m								
C <sub>MAX</sub>	9.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	0,0015	0,0015	0,0017	0,0022
D <sub>LMAX</sub>	11111	5263	1000.	526	667	667	588	454
D <sub>iCMA</sub>	> 960m	> 960m	>760m	260-340	40-60	40-80m	40-80m	20-40m
COUCHE INTERMEDIAIRE 6-8m								
C <sub>MAX</sub>	3.10 <sup>-6</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	4.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	6.10 <sup>-4</sup>	6.10 <sup>-4</sup>	7.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-3</sup>
D <sub>LMAX</sub>	3.10 <sup>5</sup>	5.10 <sup>4</sup>	2500	833	1639	1639	1351	1010
D <sub>iCMA</sub>	>940m	>940m	>960m	540-600	260 m	280 m	180-260	60 m

C<sub>max</sub> : concentration maximale sur le profil  
 D<sub>Lmax</sub> : dilution minimale atteinte  
 D<sub>iCMA</sub> : distance où cette concentration maximale est atteinte

### III.4.3 Echanges verticaux entre des couches animées de courants différents en intensité et direction

Lorsque le courant est variable sur la verticale, c'est à dire en général plus faible en profondeur et parfois tournant, la partie de l'effluent qui se disperse dans les couches d'eau inférieures subit un mélange et un transport différent par rapport à la surface.

Si le courant est faible au dessous du nuage initial, l'effluent qui atteint les couches inférieures reste confiné dans la zone proche du panache ; il se dilue moins. Si le courant tourne par rapport à la surface, le nuage est distordu.

La *figure III.8* illustre graphiquement la forme du nuage dans quatre cas de profil de courant. Dans le cas A, le courant étant constant et unidirectionnel, l'épaisseur du nuage augmente par diffusion verticale au fur et à mesure que l'on s'éloigne du rejet. Dans le cas B, le courant unidirectionnel décroît vers le fond ; l'épaisseur du nuage est maximale dans les 500 premiers mètres et diminue ensuite. Les cas C et D montrent le même phénomène mais avec un courant tournant qui entraîne le nuage vers le Nord en profondeur.

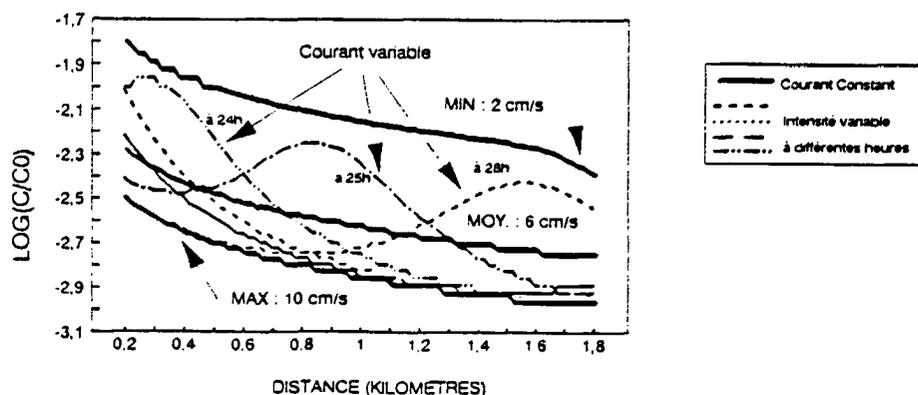
### III.5 RESULTATS DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE AVEC DES COURANTS VARIABLES DANS LE TEMPS

Tous les essais précédents ont été réalisés avec des courants constants dans le temps. Or dans la réalité, les mesures nous ont montré leur forte variabilité autant en intensité qu'en direction. Il existe notamment un cycle journalier qui suit le régime des vents, avec une alternance de brise de mer et de brise de terre; la rose de courant décrit alors une ellipse, avec une accélération à certaines heures de la journée. Ce cycle est perturbé par l'installation de vents plus forts venant du Nord ou de l'Est.

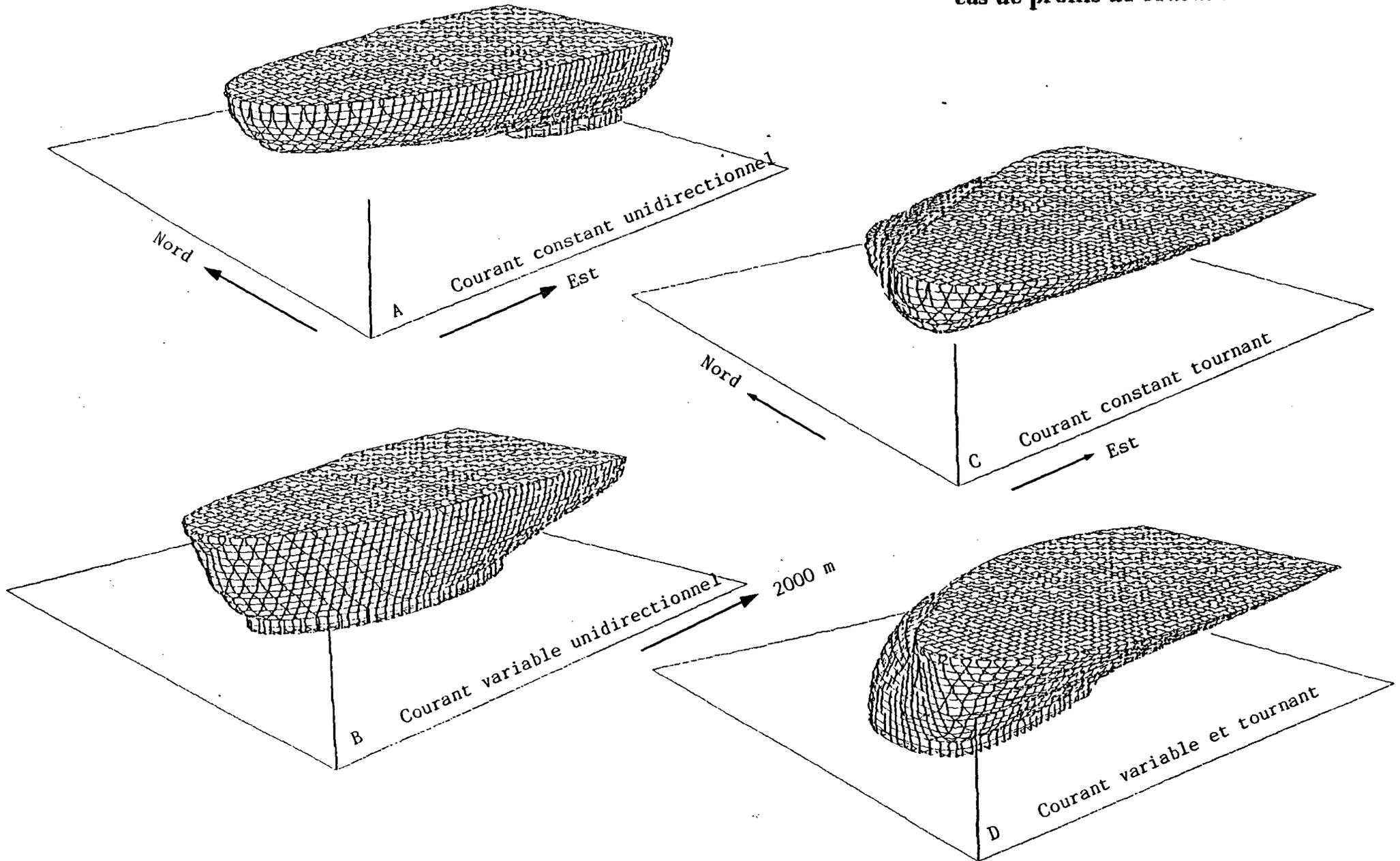
Les valeurs des dilutions qui ont été présentées plus haut ne sont donc qu'indicatives, puisque l'état stationnaire est rarement atteint dans la réalité, sauf dans le cas de courants forts. Le nuage suit donc l'évolution du milieu et la répartition des concentrations à un instant donné représente le résultat d'une suite de situations antérieures, celles-ci dépendant de l'évolution du vent et de la stratification.

Dans ce cas, la concentration en fonction de la distance ne suit plus une courbe décroissante et régulière; des lentilles de concentrations plus fortes se forment, et sont transportées dans la zone. La *figure III.9* montre les variations des concentrations sur la distance et à différentes heures, en prenant un courant unidirectionnel mais variant sinusoidalement en fonction du temps, avec une période de 12 heures (brises côtières). Les dilutions peuvent varier d'un facteur 4 entre deux instants ou deux distances.

FIGURE III.9 DILUTION INVERSE ( $C/C_0$ ) EN FONCTION DE LA DISTANCE AVEC COURANT CONSTANT ET COURANT VARIABLE EN INTENSITE



**Figure III.8 : Nuage en 3 dimensions pour différents cas de profils de courants**



Limite du nuage :  $1 \cdot 10^{-4}$  (dilutions  $10^4$ )  
 Flux : 200 mg/s sur 4 m en surface  
 Profondeur totale = 16 m

Lorsque le courant tourne, le nuage est entraîné dans des directions différentes (*figure III.10*). Si le courant est faible, le nuage n'a pas le temps de s'échapper de la zone autour du rejet (ici 1 à 2 km autour), et on assiste à une accumulation de l'effluent, qui provoque une sorte de "bulle" de concentration plus forte. Cette bulle est ensuite reprise par un courant plus fort (induit par un coup de vent par exemple) et transportée plus loin. Un exemple est donné sur la *figure III.11*, où après une période de calme, (régime de brises côtières faibles et alternatives), un vent fort s'établit en quelques heures et chasse le nuage. L'effluent s'étant peu dilué pendant la période de courants faibles, c'est une bouffée de fortes concentrations qui est ainsi transportée.

Les résultats du modèle en état stationnaire ne rendent pas compte d'un tel "accident", qui correspond à un état transitoire fréquent entre deux régimes de vents et de courants.

### III.6 INFLUENCE DU DEBIT DE L'EFFLUENT

Le flux de matière, injecté dans le milieu par le rejet, peut varier, soit à cause de la concentration  $C_0$  de l'effluent, soit à cause du débit  $q_0$ .

Pour un même débit, l'augmentation de la concentration dans l'effluent ne fait pas varier la dilution. La concentration dans la zone d'étude de tel ou tel paramètre est égale au produit de la concentration calculée par le modèle pour  $C_0 = 1$  et de la concentration réelle  $C_0$  du paramètre dans l'effluent.

Lorsque le débit de l'effluent change, et sans tenir compte de la variation correspondante du comportement du panache de remontée, la dilution diminue proportionnellement :

Soit :

- pour un débit  $q_0 = q_{0i}$ ,
- une concentration initiale  $C_0 = C_{0i}$ ,
- la concentration dans le nuage  $C = C_i$ ,

on aura :

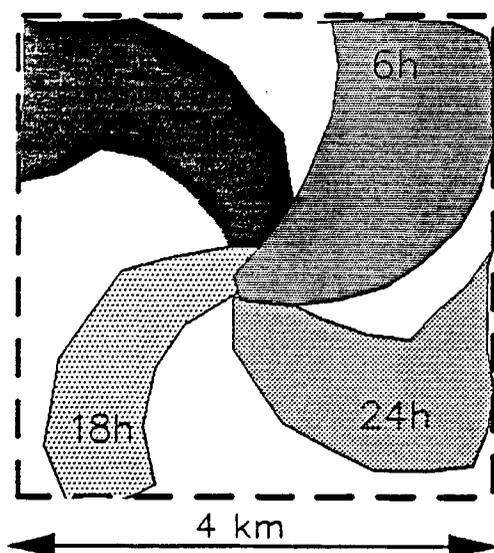
- pour un nouveau débit  $q_0 = q_{0p}$ ,
- une concentration dans l'effluent  $C_{0p}$ ,
- une concentration dans le nuage  $C_p$  calculée de la façon suivante :

$$C_p = C_i \frac{C_{0p} \cdot q_{0p}}{C_{0i} \cdot q_{0i}}$$

Les flux sortant de la zone dans les différentes directions seront donc multipliés d'autant.

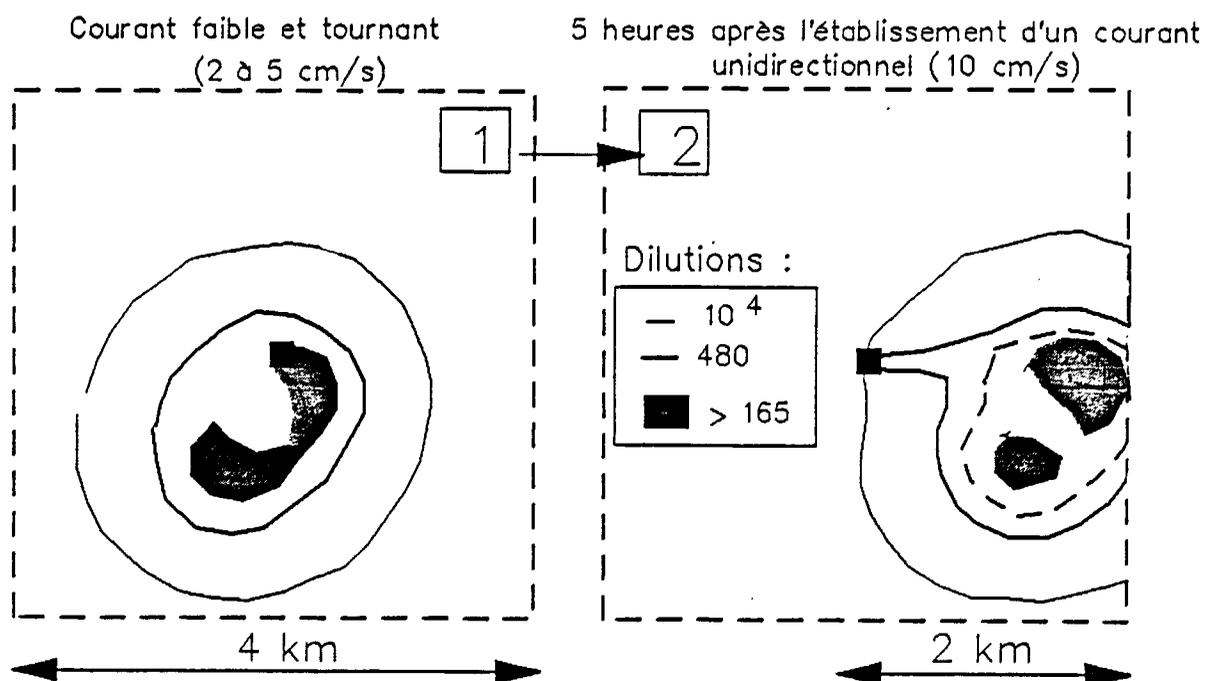
D'après les mesures de débit dans la station d'épuration, on a vu que 80 % des débits journaliers étaient inférieurs au débit moyen utilisé dans les calculs ( $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Entre un débit d'étiage de  $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$  et un débit d'orage de  $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$ , le flux est multiplié par 4.

FIGURE III.10



Limite du nuage en surface  
à différentes heures  
avec un courant constant ( $=5\text{cm/s}$ )  
et tournant au cours du temps  
(limite du nuage : dilution  $=10^4$  )

FIGURE III.11 ETABLISSEMENT D'UN COURANT FORT (2)  
APRES UNE PERIODE DE CALME VARIABLE (1)



Flux constant

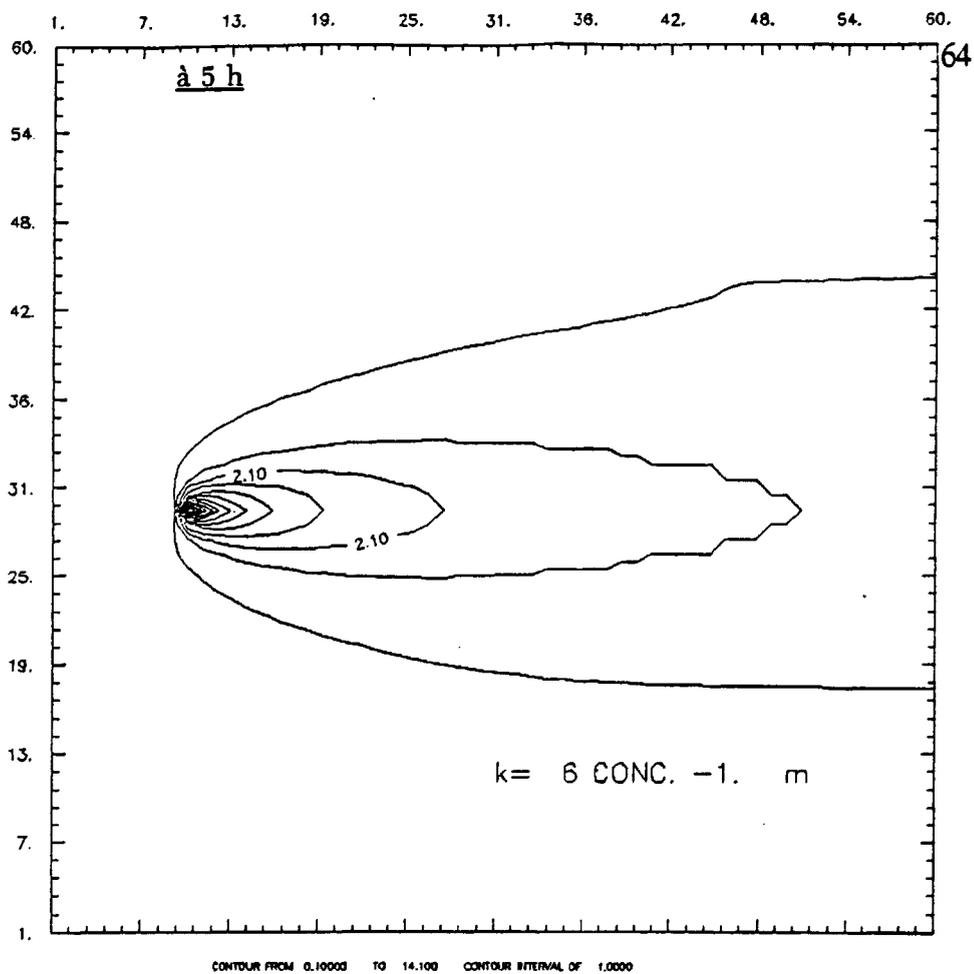
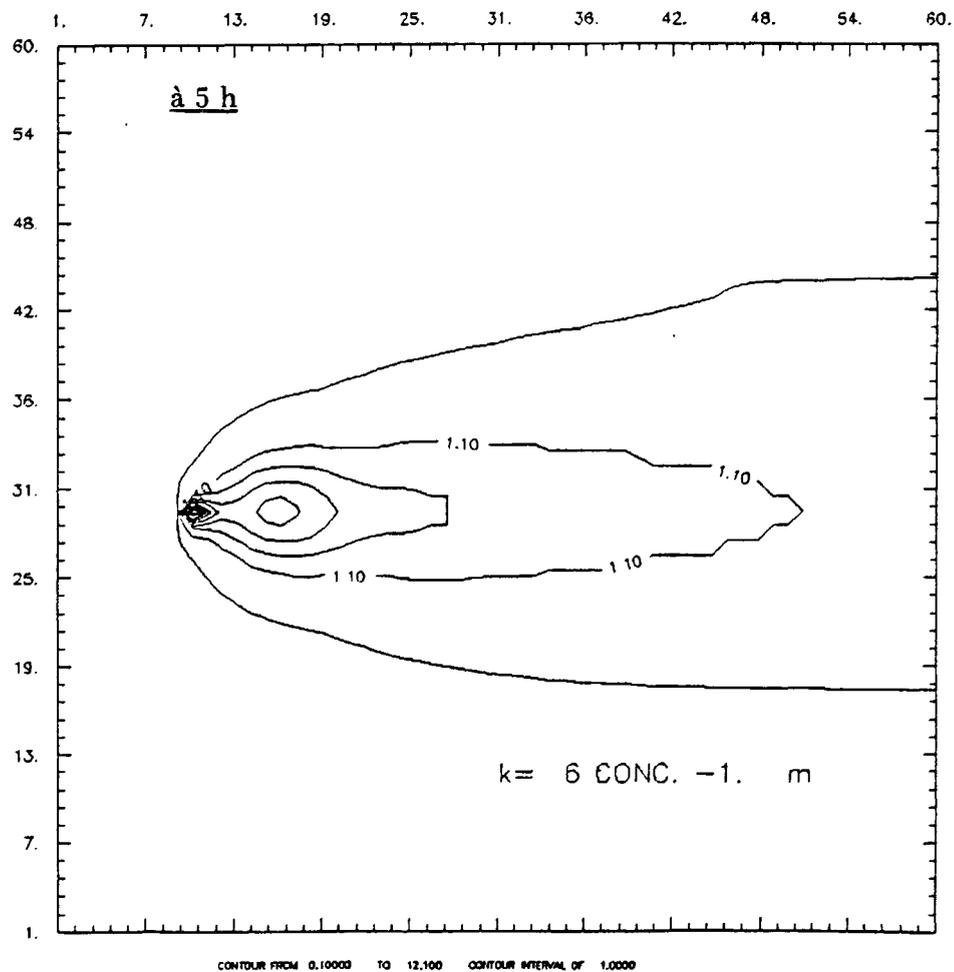


Figure III.12 : Coupe horizontale du nuage à 5 h en surface  
Comparaison de 2 simulations - Variation Haute Fréquence du débit

Flux variable  
(sinusoïde de période  
30 minutes)



### A. VARIATIONS HAUTES FREQUENCES DU DEBIT

L'analyse des débits instantanés sortant de la station d'épuration de TOULON-EST avait montré (IFREMER 1986) des variations de courtes périodes, dues au fonctionnement des pompes de relèvement qui acheminent l'effluent vers la station.

Ces variations de courtes périodes (quelques minutes à quelques heures) ont lieu surtout par débit faible, lorsque le débit n'est pas suffisant pour permettre aux pompes de fonctionner en continu. On observe alors des oscillations de 40 à 80% autour de la valeur moyenne.

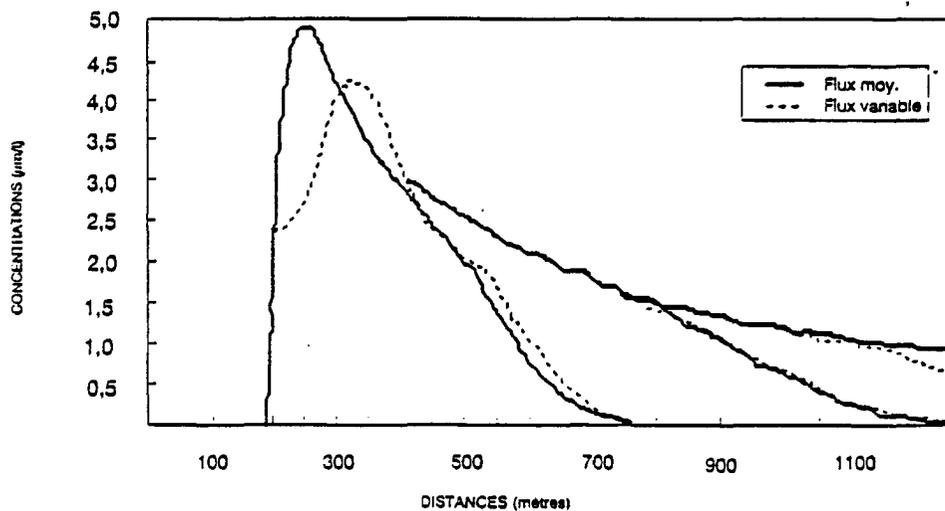
Un test a été réalisé sur le même cas d'école que celui utilisé pour tester le coefficient de diffusion verticale et la vitesse de chute. La profondeur de 16 mètres est représenté par 8 couches. Les courants sont constants (10 cm/s).

Le flux varie sinusoïdalement avec une période T de 30 mn:

$$F = F_{\text{moy}} + 0,8.F_{\text{moy}}.\sin(2.\pi.t/T)$$

Les coupes longitudinales du nuage à - 1 m (*figure III.12*) comparent les résultats pour une simulation avec un flux constant égal à  $F_{\text{moy}}$  et la même simulation avec un flux variant sinusoïdalement. Des différences sont observées surtout dans la zone proche du rejet, à moins de 500 mètres de distance. (*figure III.13*)

Figure III.13



## B. VARIATIONS JOURNALIERES

Un cycle journalier du débit a été mis en évidence (IFREMER 1986). Il se caractérise par un important maximum dans la matinée (entre 10 et 13 h) et un autre moins marqué en début de soirée (entre 19 et 22 h), avec un minimum accusé pendant la nuit. Ces variations journalières atteignent 45 % de la valeur moyenne.

Nous avons testé un cycle journalier du flux entrant en période homogène. Le flux est calculé en fonction du temps de la manière suivante :

$$F = F_{\text{moy}} + 0,25.F_{\text{moy}}.\sin(2.\pi./T_1.(t-5)) + 0,20.F_{\text{moy}}.\sin(2.\pi./T_2.(t-5))$$

avec  $T_1 = 24$  heures et  $T_2 = 12$  heures ;  $t$  est exprimé en heures (*figure III.14*)

Le stock d'effluent présent dans la zone varie dans la journée à cause de la rotation des courants (*figure III.15*). Le maximum de 6 heures du matin est plus faible (10% de moins) quand le flux est variable, tandis que le maximum de 15 heures est plus fort (20% de plus)

Les flux sortant de la zone sont exprimés en mg/s et par mètre de profondeur. Ils sont plus forts à travers les faces SW,W, NW et Nord entre 10 heures et 18 heures. Les maximums augmentent d'environ 15 à 30%.

## C. VARIATIONS PAR TEMPS D'ORAGE

Les précipitations provoquent de fortes perturbations sur le débit sortant de la station d'épuration. D'après l'analyse effectuée sur les débits de 1984 et 1985 (IFREMER 1986), les variations dues à la pluie sont le premier jour de 20 à 300% de la valeur moyenne selon l'importance de la pluie. L'effet d'un orage se fait sentir encore pendant plusieurs jours, l'accroissement du débit par rapport à la moyenne d'été est une fonction inverse du temps (au bout de 10 jours l'augmentation du débit est divisée par 10, elle est donc encore de 2 à 30 % par rapport à la moyenne selon la pluie).

Ces variations du débit à basse fréquence introduisent donc des variations sur les flux journaliers qui sortent de la zone d'étude. L'augmentation de ces flux se fait dans le même rapport que celui des débits, à même concentration dans l'effluent, et même comportement du panache de remontée.

## III.7 COMPORTEMENT D'UN PARAMETRE NON CONSERVATIF

L'effluent est composé d'un certain nombre de contaminants, matière organique dissoute et particulaire, composés organiques (détergents, PCB etc.), métaux lourds et germes tests à intérêt sanitaire.

Certains de ces paramètres ne sont pas conservatifs et subissent des transformations telles que dégradation, floculation pour les matières en suspension, mortalité pour les bactéries. Ces transformations interviendront dans la zone d'étude en modifiant les concentrations de façon plus ou moins importante selon leur vitesse.

Deux processus ont été testés ici : la floculation et chute des particules et la mortalité bactérienne. Le plus important est celui de la disparition des bactéries qui dépend de la lumière incidente, dont une loi a pu être mise en évidence au cours de cette étude (POMMEPUY *et al* -1991).

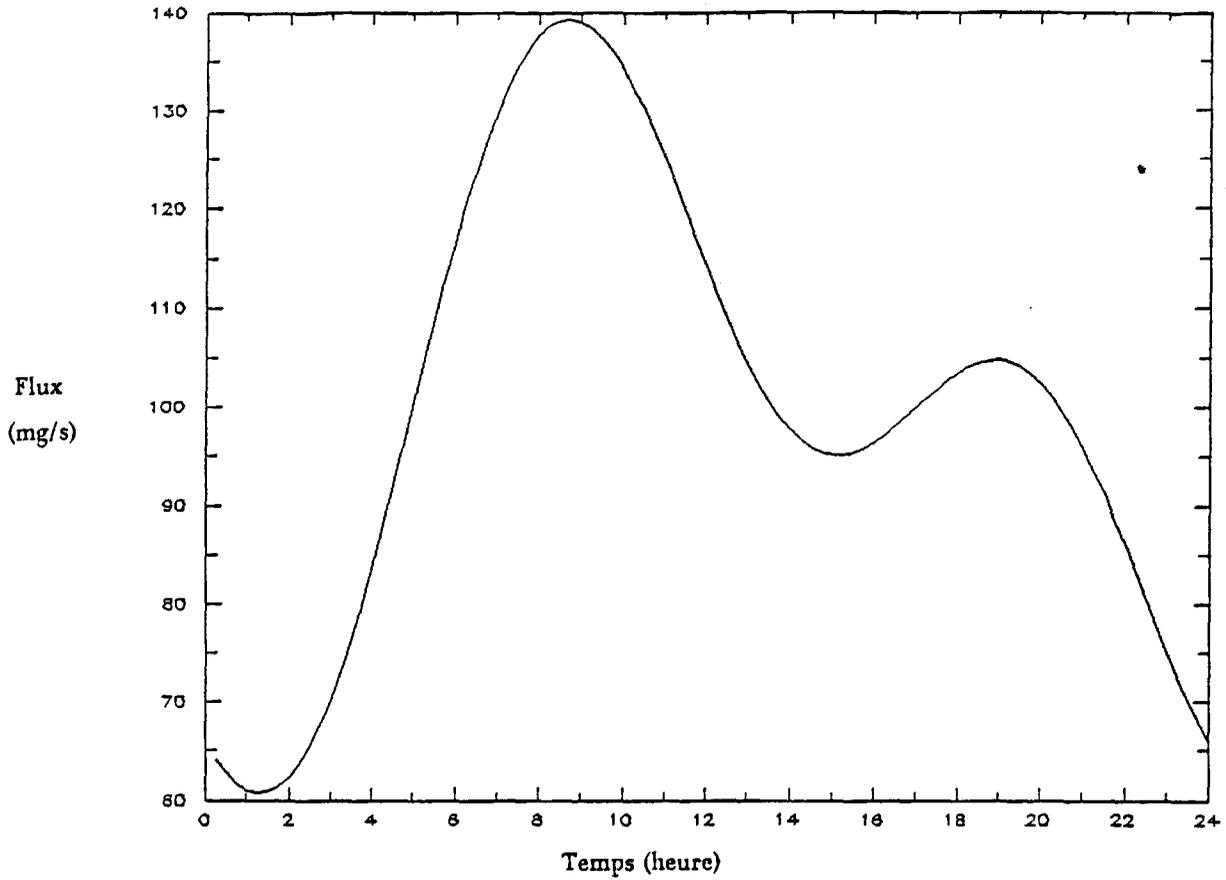
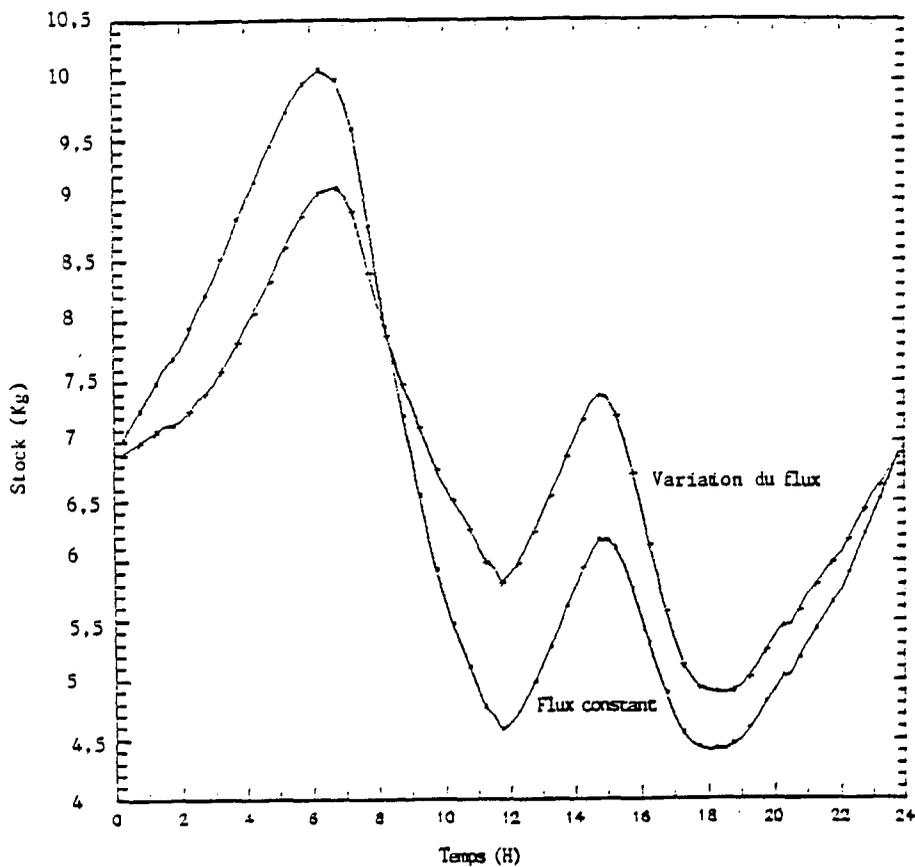


Figure III.15 : Variation du stock d'effluent présent dans la zone au cours d'une journée pour un flux entrant constant ou variable



### III.7.1 FLOCCULATION-CHUTE

Une théorie quantitative du phénomène de floculation a été proposée par HUNT(1982), selon une analyse de FRIEDLANDER. Il étudie plus spécifiquement trois mécanismes de coagulation qui déterminent une variation du nombre de particules selon des modes de collision différents. Ces trois mécanismes sont le mouvement Brownien, le cisaillement et la sédimentation différentielle. Selon les propriétés du fluide et des particules, en particulier de leur volume, l'un ou l'autre des mécanismes est prédominant.

Après simplifications, et en suivant certaines hypothèses, chaque mécanisme de coagulation peut être caractérisé par un seul paramètre, indépendant de la taille des particules.

HUNT et PANDYA (1984) donnent des informations sur la floculation des vases sortant d'une station d'épuration, et diluées dans une eau de mer. Afin de modéliser leurs expériences de floculation-sédimentation en laboratoire, ils ne tiennent compte que du mécanisme de cisaillement et proposent une cinétique du deuxième ordre du type :

$$dC/dt = -b C^2$$

avec C : concentration en mg/l  
et b : vitesse en l/mg/s

Leurs mesures réalisées dans des cylindres, dont une paroi tourne pour créer une turbulence de cisaillement, leur permettent de connaître le paramètre b pour certains type de vases ou de particules, et en fonction de la vitesse de cisaillement artificiellement créée.

L'ordre de grandeur de b et la vitesse de sédimentation associée sont donnés dans le tableau ci-après, en fonction de la "vitesse de cisaillement" du fluide (G):

G (s <sup>-1</sup> )	b (mg <sup>-1</sup> L s <sup>-1</sup> )	wc (mm s <sup>-1</sup> )
0	1.E-06	2.8E-02 à 3.3E-02
0.25	1.4E-06	
0.5	1.5E-06	3.5E-02 à 4.1E-02
1	2.5E-06	
2	3.3E-06	8.8E-02 à 0.10
4	4.2E-06	
8	9.1E-06	0.102 à 0.113

Il est difficile d'extrapoler ce type d'expérimentations à des études en mer, et à un rejet d'un type différent que celui utilisé pour ces mesures. D'autre part, on connaît mal la "vitesse de cisaillement" présente dans le milieu naturel, exprimée ici en s<sup>-1</sup>.

Nous avons fait quelques essais, en utilisant cette cinétique du second ordre, et en testant des valeurs de b, pour un rejet plus ou moins riche en matières en suspension.

Lorsque le courant est suffisamment fort pour entraîner rapidement le nuage hors de la zone et créer une dilution importante, le phénomène de floculation, exprimé par cette loi, ne se développe pas de manière significative, les résultats ne changent pas, même avec une valeur maximale de b (9.E-06 mg<sup>-1</sup> L s<sup>-1</sup>).

Par contre, si le courant est faible et tournant, c'est à dire que le nuage reste confiné dans la zone et se mélange peu, le phénomène de floculation produit une descente du nuage vers le fond, analogue à l'effet d'une chute.



### III.7.2 MORTALITE DES BACTERIES - INFLUENCE DE LA LUMIERE

Les mesures qui ont été réalisées au cours de cette étude ont permis de dégager une loi reliant la cinétique de disparition apparente des germes tests en fonction de l'intensité lumineuse disponible (MARTIN et al-1990; POMMEPUY et al-1990) (figure III.17).

A titre d'exemple, un premier test a été réalisé avec un courant constant, égal à 10 cm/s; le transport, le mélange et la mortalité des bactéries introduites par le rejet sont calculés dans plusieurs couches, d'épaisseur égales à 4 mètres, sans échange vertical entre elles. Le flux introduit par l'effluent est le même dans chacune des couches, et le courant aussi. Seule varie la profondeur, et donc l'intensité lumineuse incidente. Celle-ci est constante dans le temps.

L'intensité lumineuse varie en fonction de la profondeur selon une loi exponentielle du type :

$$I = I_0 \cdot e^{-ke \cdot z}$$

$ke$  = coefficient d'extinction = 0,114

$z$  = profondeur à partir de la surface

$I_0$  = intensité lumineuse en surface = 2500  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$   
= 51  $\text{mW}/\text{m}^2$

La valeur de  $I_0$  correspond à une intensité lumineuse forte, que l'on rencontre couramment en milieu de journée, sauf en hiver (de novembre à avril). Le maximum en été est de 90 ou 100  $\text{mW}/\text{m}^2$ , alors qu'en hiver il ne dépasse pas 50 à 70  $\text{mW}/\text{m}^2$ .

A partir de la surface (couche 1;  $z=2\text{m}$ ) et jusqu'à 30 mètres de profondeur (couche 8), on obtient, grâce à cette loi, un éventail de valeurs du coefficient de mortalité correspondant à différentes intensités lumineuses. Le tableau T17 présente les résultats dans chacune des couches.

Selon la profondeur, et donc l'intensité lumineuse disponible, la disparition bactérienne est plus ou moins forte. Alors qu'en surface, la "dilution" 10000 est atteinte à 520 mètres du rejet, elle ne l'est pas encore à 2km de distance et à 30 mètres de profondeur.

TABLEAU T17

	1	2	3	4	5	6	7	8
$z$ (m)	30	26	22	18	14	10	6	2
$I$	82	129	203	321	507	799	1261	1990
$K_{CF}$	0,0032	0,0047	0,0076	0,0115	0,0177	0,027	0,042	0,064
$C_1/C_0$	0,042	0,042	0,041	0,041	0,040	0,040	0,038	0,036
$C_3/C_0$	0,014	0,013	0,012	0,011	0,0092	0,0071	0,0048	0,0026
$D_{330}$	1380	1080	840	640	480	360	260	200
1000	>2000	>2000	780	1140	820	580	420	300
10000	>2000	>2000	>2000	>2000	1640	1120	780	520
$q_D$ 1	2,88	3,16	3,47	3,63	4,36	5,49	7,94	14,45
2	1,46	1,52	1,58	1,82	2,09	2,75	3,98	7,24
3	1,23	1,3	1,39	1,55	1,82	2,29	3,47	6,02
4	1,17	1,22	1,31	1,46	1,74	2,19	3,16	5,75

$C_0$  : concentration dans l'effluent = 1

$C_1$  : concentration en surface au droit de l'émissaire

$C_3$  : concentration à 200 mètres de l'émissaire

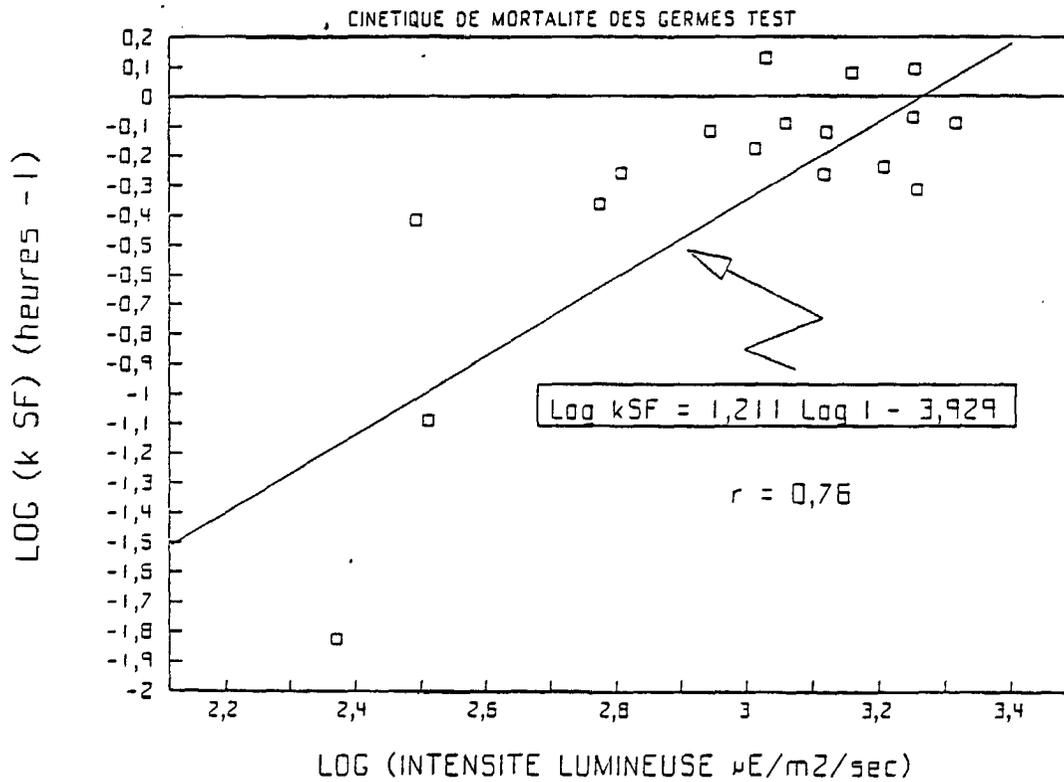
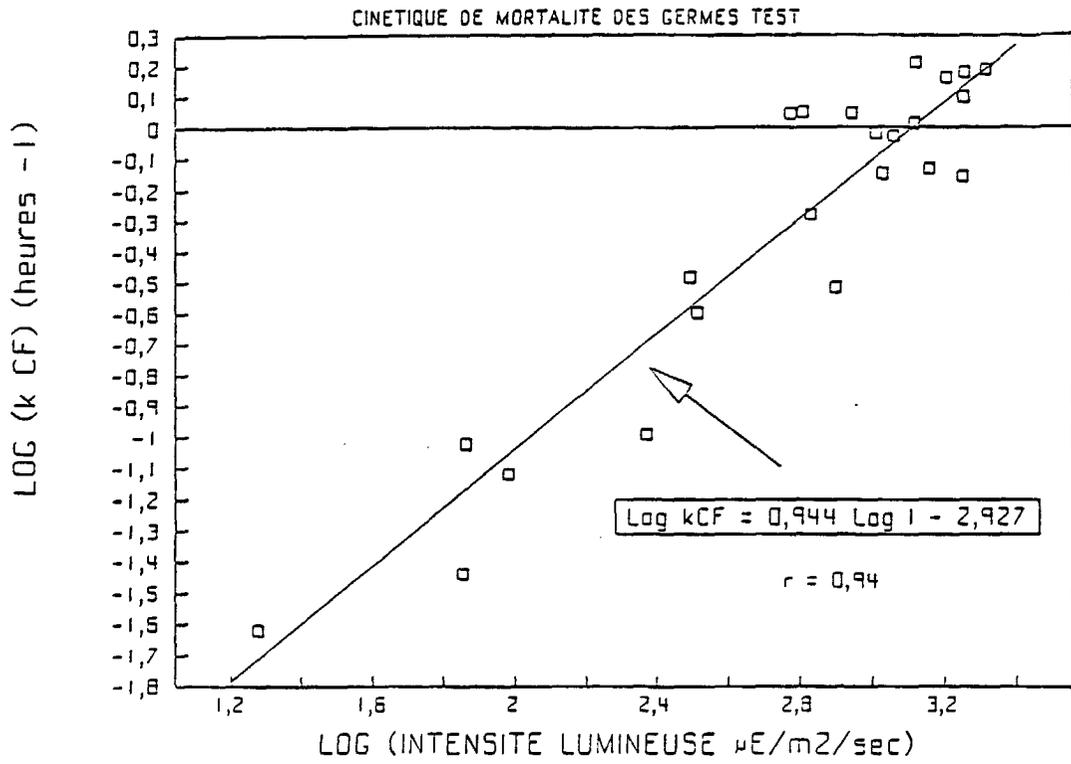
$D_{330}$  : distance à partir de laquelle la dilution dépasse 330

1000 : distance à partir de laquelle la dilution dépasse 1000

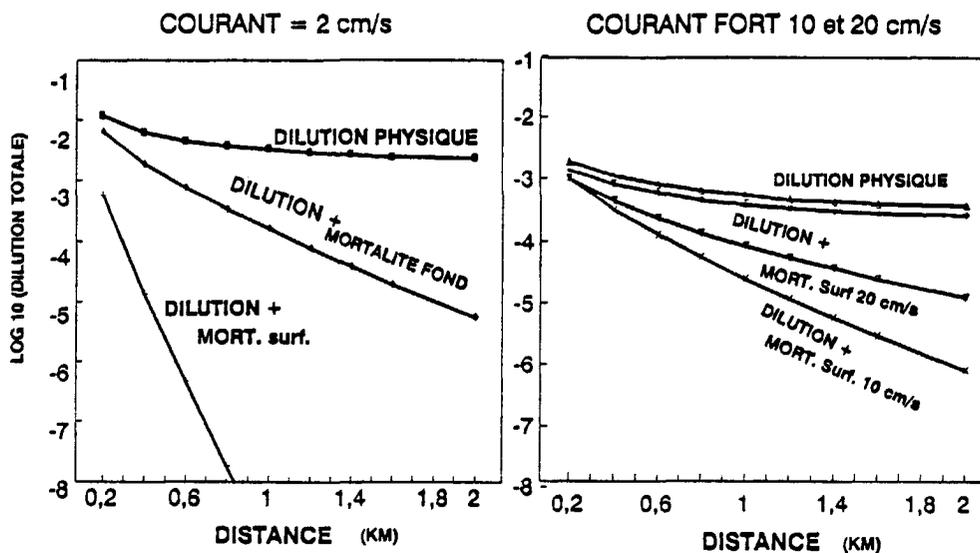
10000 : distance à partir de laquelle la dilution dépasse 10000

$q_D$  1;2;3 et 4 : taux de décroissance par 200 m entre 0 et 200 mètres, entre 200 et 600 mètres, entre 600 et 1000 mètres, entre 1000 et 1800 mètres respectivement.

REJETS URBAINS - VOLET MEDITERRANEE

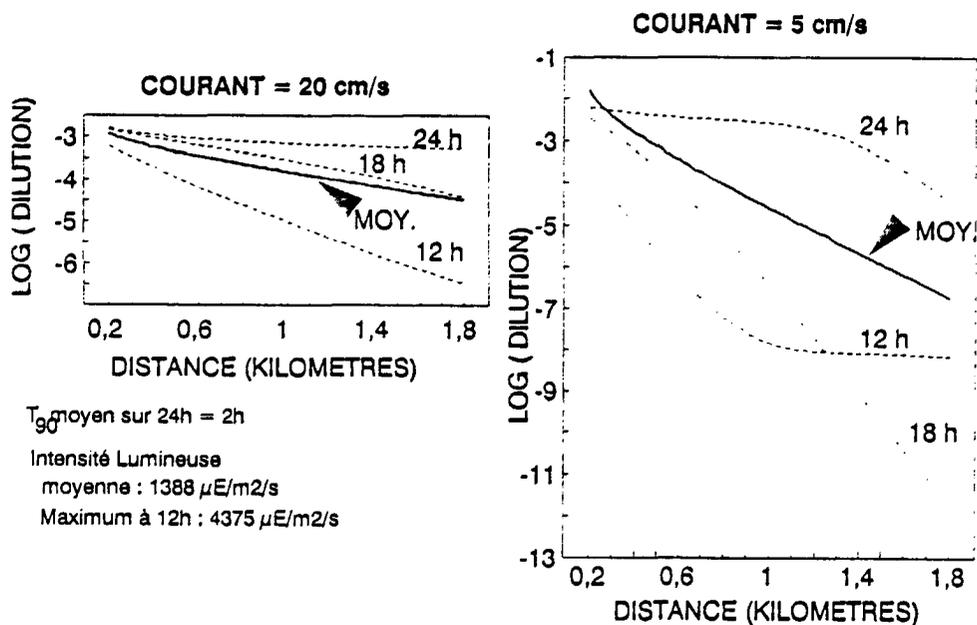


**FIGURE III.18** DILUTION + MORTALITE DES BACTERIES  
EFFICACITE DU PHENOMENE DE DISPARITION  
PAR RAPPORT AU TEMPS DE SEJOUR



**FIGURE III.19** DILUTION EN FONCTION DE LA DISTANCE AU REJET  
TRANSPORT - MELANGE ET MORTALITE

COMPARAISON SUR 24 HEURES ENTRE MORTALITE MOYENNE (T90 CONSTANT)  
ET CINETIQUE VARIABLE EN FONCTION DE LA LUMIERE



Ces valeurs ne sont qu'indicatives et relatives à un courant constant assez fort de 10 cm/s. Or l'efficacité du phénomène de disparition des bactéries par rapport à la dilution physique dépend essentiellement du courant, et par là du temps de séjour dans la zone.

Soumis à un courant faible, qui ne produit pas une dilution importante, les bactéries de l'effluent subiront par contre une forte mortalité, liée au temps de résidence. L'efficacité de cette disparition, même en surface, est bien moindre avec un courant plus fort. (*figure III.18*).

D'autre part, ce phénomène n'est pas constant en fonction du temps, puisque qu'il varie avec la luminosité. La nuit, les bactéries ne subissent que la dilution physique et sont transportées sans subir de mortalité plus ou moins loin du rejet selon l'intensité du courant. La *figure III.19* montre les variations du profil longitudinal de concentration pour deux situations de courant et à différentes heures de la journée.

On observe à 1,5 kilomètre du rejet et pour un courant de 20 cm/s, un abattement de 6,5 log à midi, et de 3 log à minuit. Avec un courant plus faible de 5 cm/s, la différence est encore plus importante entre les différentes heures de la journée.

Il est à noter l'erreur que l'on peut commettre sur les concentrations, si on prend une luminosité moyenne, (sur la *figure III.19* courbe notée "MOY"), comparée à une luminosité variable.

L'application du modèle à quelques scénarios rencontrés pendant la période de mesure permettra de visualiser l'effet de mortalité sur les bactéries dans la zone autour du rejet, dans des cas plus réalistes.



## CONCLUSION DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE

La deuxième phase de dilution de l'effluent concerne le transport et le mélange du nuage de pollution; celui-ci est formé par le rejet, plus ou moins dilué, qui est remonté du fond vers la surface jusqu'à ce que l'équilibre de densité soit atteint en surface ou en profondeur.

Cette phase de mélange horizontal dépend essentiellement des courants régnants dans la zone réceptrice. Or ceux-ci sont très variables dans le temps et dans l'espace, et seul un modèle mathématique d'hydrodynamique permettrait de connaître leur évolution et de prédire avec précision le devenir du nuage dans une zone donnée.

Malheureusement, contrairement aux mers à marée, le développement de modèles hydrodynamiques dans la zone côtière Méditerranéenne se heurte à un certain nombre de difficultés, qui les rendent coûteux avec des résultats incertains quant à leur application pratique en terme de prévision d'impact.

Des simplifications sont donc nécessaires pour évaluer et quantifier les dilutions dans la zone de rejet ; le choix de ces hypothèses est guidé par la comparaison des échelles de temps caractéristiques avec le temps de séjour dans la zone.

\* Si le temps caractéristique d'un phénomène est beaucoup plus petit que le temps de séjour, il peut être moyenné, ou pris en compte empiriquement (par l'intermédiaire de coefficients dispersifs par exemple);

\* Si le temps caractéristique est beaucoup plus grand, le phénomène peut être considéré comme constant à l'échelle considérée ;

\* Si le temps caractéristique est du même ordre de grandeur que le temps de séjour, le phénomène doit être considéré dans toute sa variabilité.

Ainsi, le temps de séjour dans la zone de TOULON est de quelques heures pour des courants forts (2 à 4 h) et peut dépasser la journée lorsque les courants sont faibles. La variabilité du courant a une échelle de temps de l'ordre de quelques heures également (6-10 h). L'hypothèse de courant permanent qui permet souvent de calculer analytiquement et très simplement les dilutions d'un rejet en fonction de la distance ne peut donc être invoquée que dans le cas de courants forts, suffisamment établis dans le temps.

On a vu que la grande variabilité des courants en intensité et direction peut entraîner des structures spatiales complexes du nuage, avec notamment des bulles de concentrations transportées au gré du courant et s'échappant de la zone en ne se diluant que lentement.

Les phénomènes verticaux, tels que la diffusion ou la vitesse de chute, se développent lentement (échelles de temps de quelques dizaines à centaines d'heures). Leur prise en compte est importante dans la mesure où le temps de séjour est long, c'est à dire lorsque les courants sont faibles et giratoires, où lorsque l'on s'intéresse au devenir à long terme du rejet.

Les phénomènes de transformations biochimiques ou biologiques des paramètres rejetés dans l'effluent ont, à quelques exceptions près, un temps caractéristique très long. Ce temps caractéristique est déterminé par l'inverse de la cinétique de transformation.

Le programme REJETS URBAINS - VOLET MEDITERRANEE a mis en évidence certains contaminants, qui ont une importance pour l'impact d'un rejet, soit à cause de leurs fortes concentrations dans l'effluent, soit à cause de leur toxicité vis à vis du milieu ou de l'homme. Ces polluants sont :

- les bactéries pathogènes
- les détergents

Pour les bactéries, la cinétique de disparition apparente a été étudiée, et son échelle de temps caractéristique est de l'ordre de quelques heures pendant la journée. Ce phénomène doit donc être pris en compte, ce qui va dans le sens d'une décontamination par le milieu; mais cette échelle de temps est beaucoup plus grande pendant la nuit (quelques jours), et une moyenne journalière (sur 24 heures) de cette transformation entraîne des erreurs de plusieurs ordres de grandeur dans les dilutions attendues.

Pour les détergents, la cinétique de transformation est difficile à déterminer, étant donné le nombre d'espèces différentes. En prenant les détergents globalement, elle est considérée comme suffisamment lente, pour pouvoir la négliger et faire l'hypothèse que les détergents sont conservatifs à l'échelle de quelques heures.

Les résultats des calculs et des modèles mathématiques indiquent les ordres de grandeur de la dilution que subit le rejet en mer. La première étape dans le panache de remontée introduit une dilution variable selon la profondeur (20 à 150 fois pour une profondeur de 20 à 40 mètres). Après une étape transitoire dans le champ proche du rejet, où le mélange est encore intense et où la dilution est multipliée par un facteur 2 à 20 dans les 100 à 200 premiers mètres autour de l'émissaire, le nuage ne subit ensuite plus qu'un faible mélange pendant son transport par les courants (dilution multipliée par 1,5 à 3 tous les 500 mètres).

Cette observation est en partie à l'origine de la construction d'émissaires profonds et de diffuseurs permettant de favoriser la dilution au cours de la première étape de remontée du panache, plus efficace que le transport par les courants horizontaux, généralement faibles en mer Méditerranée. Ceci entraîne également que pour un paramètre donné du rejet, si l'abattement des concentrations n'est pas suffisant dans la zone du panache ou dans les 100 premières mètres autour, il faudra peut-être une longue distance avant de l'atteindre, et de trouver les concentrations du bruit de fond.

Par exemple pour les coliformes fécaux, dans le cas d'un rejet tel que celui de TOULON, la norme de 2000 CF/100ml sera atteinte relativement facilement dans la zone du panache ou dans la zone très proche si la concentration initiale dans l'effluent est de  $10^6$  CF/100ml. Par contre, cette norme ne sera atteinte qu'au bout de plusieurs kilomètres si la concentration initiale est seulement 10 fois plus forte.  $10^6$  et  $10^7$  CF/100ml sont pourtant les concentrations moyennes rencontrées dans l'effluent respectivement en hiver et en été.

Pour les détergents, la distance à partir de laquelle le bruit de fond est atteint dépend beaucoup du courant, elle varie entre 50 mètres et 1 à 2 kilomètres environ.

En l'absence de courantologie dans la zone, il n'est pas possible de connaître précisément l'impact réel du rejet dans la rade de Toulon et dans la région côtière environnante, dont la complexité hydrodynamique est grande.

Cette étude s'est donc attachée uniquement à une zone proche du rejet (1 à 2km autour), et certaines simplifications ont pu être utilisées, notamment l'uniformité spatiale des courants et la profondeur constante. L'outil de modélisation utilisé privilégie l'étude temporelle du comportement du nuage, associé à des courants variables, et l'étude de son développement vertical par diffusion verticale et chute des particules, ainsi que la possibilité d'introduire des phénomènes de transformations simples. Il ne peut pas être appliqué à des zones plus étendues ou plus hétérogènes, ou bien il doit être associé à un modèle hydrodynamique complet.

**TABLEAU VI**

**CAMPAGNES PLURIDISCIPLINAIRES DANS LE MILIEU RECEPTEUR**

CAMP. N°	DATE	MARQUEUR			CARACTERISTIQUES		
		TYPE MARQUEUR	ENDROIT INJECTION	DUREE (MN)	DEBIT STATION	ETAT DE LA MER	PARAMETRES ETUDIES
1 : C1	18 JUN 1986	TECHNE- TIUM	STATION EPURATION	0,75	600	BELLE	T
3 : C1	19 JUN 1986	AU 198	STATION EPURATION	61,5	450	BELLE	T H B
6 : C2	16 OCT. 1986	AU 198	STATION EPURATION	98	800	PEU AGITEE	T H P B
6 : C3	15 AVR. 1987	RHODAMIN	STATION EPURATION	1	860	BELLE	T H B E
7 : C4	19 JUN 1987	TECHNI- TIUM	SURFACE	0	760	PEU AGITEE	T H B E
8 : C5	8 SEPT. 1987	AU 188	STATION EPURATION	137	700	AGITEE	T H P B E
9 : C5	10 SEPT. 1987	AU 188	STATION EPURATION	92	840	BELLE	T H P B E
11 : C6	27 AVR. 1988	BOUES	STATION EPURATION	240	1000	BELLE	H P B
12 : C6	29 AVR. 1988	RHODAMIN	STATION EPURATION	1	1120	AGITEE	T H B E

PARAMETRES ETUDIES :

T : Suivi du traceur  
H : Paramètres hydrobiologiques  
P : Paramètres de pollution chimique  
B : Paramètres bactériens  
E : Paramètres écotoxicologiques

<p style="text-align: center;"><b>CHAPITRE IV</b></p> <p style="text-align: center;"><b>APPLICATION DU MODELE AUX CAMPAGNES DE MESURES EN MER</b></p>
---

## INTRODUCTION

Les modèles calculant la remontée du panache et le transport et mélange du nuage ont été appliqués aux campagnes de mesures réalisées dans la zone d'étude pour le programme REJETS URBAINS.

Les résultats sont comparés aux mesures effectuées "in situ", et certains coefficients sont calés afin de connaître leurs ordres de grandeur. Les limites de validité des modèles sont reconnues. D'autre part, ces applications à des cas réels observés ont mis en évidence les difficultés de comparaison entre des mesures ponctuelles et instantanées dans un milieu très turbulent et les résultats de calculs déterministes, basés sur des données moyennes.

Les campagnes ne sont pas présentées par ordre chronologique mais en suivant l'ordre où elles ont été traitées. Tout d'abord les campagnes en période homogène, puis celles se déroulant en milieu stratifié. Le *tableau VI* présente les caractéristiques des différentes campagnes.

### IV.1 CAMPAGNES EN MILIEU HOMOGENE

Trois campagnes en milieu homogène ont été exploitées. La première campagne "C6" a donné lieu à un certain nombre de tests qui ne seront pas renouvelés pour les autres applications, et qui sont présentées plus en détail en *annexe 4*.

La discrétisation horizontale du modèle en couches est la même pour chaque application. La maille horizontale est un carré de 20 mètres de côté. Le nombre et l'épaisseur de chacune des couches dépendent de la campagne. Les coefficients de diffusion horizontale sont les mêmes pour chaque campagne et égaux à ceux de la campagne C6 du 29 avril 1988.

Les données injectées dans le modèle sont représentées pour chaque campagne dans une fiche. Ces fiches, notées Ci (i étant le numéro de la campagne) sont regroupées dans l'*annexe 5*. Le nombre et l'épaisseur des couches sont illustrés par le profil vertical en escalier de la densité.

Les résultats du modèle "JET" sont visualisés dans l'*annexe 3*, pour chaque campagne.

### IV.1.1 Campagne C6 : Rhodamine du 29 avril 1988

Une campagne de marquage de l'effluent de Ste Marguerite par une injection de rhodamine s'est déroulée le 29 avril 1988 par vent faible de Sud-Ouest et densité pratiquement homogène sur la profondeur. Quatre courantomètres étaient mouillés dans la zone proche de l'émissaire, malheureusement le courantomètre placé en surface était défectueux. Des profils de sonde T.S ont été réalisés le 24 avril et le 3 mai. Les données de météorologie sont tirées des mesures de la Météorologie nationale en valeurs trihoraires.

#### DONNEES DE L'EFFLUENT

Le débit de l'émissaire est légèrement plus fort que la moyenne (1116 m<sup>3</sup>/h).

L'injection instantanée de 20 kg de rhodamine a été réalisée dans deux récipients de 25 litres (concentration = 400 g/l) (RAMADE 1988). La densité de l'effluent correspond à une température de 15 °C. La solution benzilique de rhodamine B.S.A déversée dans l'effluent a une densité initiale de 0.7. En se mélangeant à l'effluent au moment de l'injection, elle se dilue environ 200 fois (50 litres déversés pendant 30 secondes dans un débit de 0.31 m<sup>3</sup>/s). Pendant son parcours à travers l'émissaire, elle va se diluer encore 4 à 5 fois. En effet, en Juin 1986, le CEA avait mesuré cette dilution entre la station et la sortie en mer dans l'émissaire pour un débit de 600 m<sup>3</sup>/h (BRISSET, 1986).

#### DONNEES DU MILIEU RECEPTEUR

##### COURANTS :

D'après les mesures des courantomètres, les courants sont inférieurs à 3 cm/s au-dessous de -15 mètres et égaux à 5 ou 6 cm/s vers -5 mètres dans des directions allant de 150 à 180° (THOUVENIN *et al* 1988).

D'après les dérives des radeaux de surface, les courants superficiels atteindraient 13 à 14 cm/s dans une direction égale à 80°. D'après les observations de la tache de rhodamine, ils seraient beaucoup plus faibles (quelques centimètres par seconde) (RAMADE 1988).

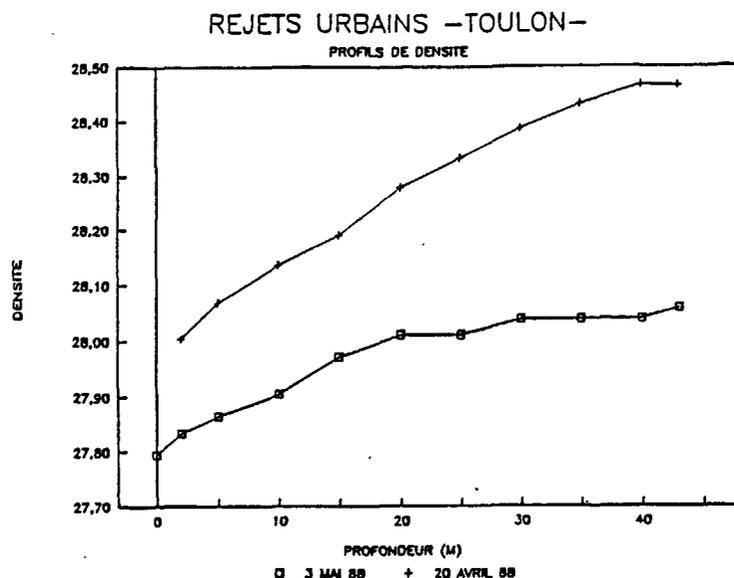
Le manque de courantomètre en surface conduit à une mauvaise évaluation des courants précisément dans la couche où la tache de pollution se mélange ce qui nuit grandement à la précision des résultats du modèle. Rappelons également que les courants sont susceptibles de varier dans l'espace et également pendant le temps du marquage (4 heures).

Le vent a augmenté pendant la campagne, de 2 m/s au moment de la sortie de l'effluent marqué jusqu'à 8 m/s quatre heures plus tard. Sa direction est assez constante (280 à 290°) ce qui porte bien le courant superficiel vers l'Est dans la direction de 80°.

Les courants choisis pour l'application des modèles seront approximativement calés en fonction du déplacement de la tache (surface = 8 cm/s au cap 80°).

##### STRATIFICATION :

Les mesures font apparaître une faible stratification de densité (0.3 à 0.4 ). On utilise dans les modèles un profil moyen entre les mesures du 20 avril et du 3 mai qui sont assez différentes (*figure C6-1*). La variation de la densité sur les premiers mètres n'est pas connue de façon précise.



## APPLICATION DES MODELES

La fiche C6, en *annexe 5*, présente les données injectés dans les modèles.

### 1. RESULTAT DU PROGRAMME "JET"

Le panache atteint la surface avec une vitesse verticale de 0.57 m/s et un débit de 20 m<sup>3</sup>/s (*annexe 3*). La différence de densité résiduelle en surface et sur l'axe du panache est de 1.7e-04.

La dilution  $D_L$  à 84 % tourne autour de 35 et 40 selon le choix des courants. Le diamètre  $D_1$  du panache est de 15 mètres, son épaisseur est de 5 mètres.

Les vitesses radiales sont de l'ordre de 5 à 10 cm/s. En observant la tache de rhodamine qui s'étale en anneau au dessus de l'émissaire pendant la première demi-heure, RAMADE estime les vitesses radiales autour du rejet : 35 cm/s entre 0 et 10 mètres ; 15 à 20 cm/s entre 10 et 50 m et autour de 3 à 5 cm/s au-delà de 50 m et ce jusqu'à 200 m.

Quelques tests sur le modèle "JET" ont été réalisés, notamment l'effet d'une variation de la densité de l'effluent et celui d'une modification de la stratification de densité en surface, dans le milieu receptrice (voir *annexe 4*)

## 2. RESULTATS DU MODELE EN COUCHES

### 2.1 Application du modèle au cas d'une injection quasi-instantanée de rhodamine

Plusieurs valeurs introduites dans le modèle sont imprécises et ont été testées :

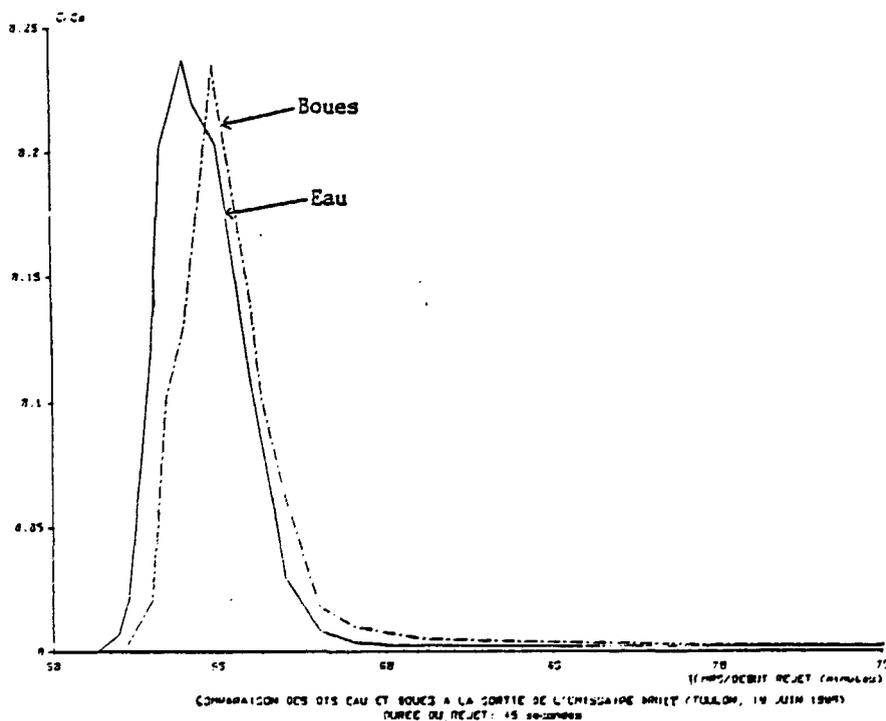
- reconstitution de l'étalement initial du panache
- répartition dans le temps et durée de l'injection
- répartition du flux sur la profondeur  
épaisseur de la couche polluée
- masse réellement injectée en mer.
- vitesses et direction des courants
- coefficient de diffusion verticale -  
formulation en fonction de la stratification
- coefficient de diffusion horizontale

L'injection de 20 kg de rhodamine en 30 secondes se mélange avec l'effluent pendant son parcours à travers l'émissaire. La forme du pic de concentration au moment de l'injection peut s'assimiler à une fonction gaussienne d'écart type de l'ordre de quelques minutes.

En effet, le CEA (BRISSET 1986) a mesuré l'évolution de la concentration d'un marqueur radioactif du rejet, injecté pendant 45 secondes dans la station et sortant au bout de l'émissaire après 50 minutes (figure C6-2). Cette mesure effectuée pendant la campagne C1 du 19 juin 1986 correspond à un débit du rejet égal à  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Les 20 kg de rhodamine n'arrivent pas en totalité au bout de l'émissaire. Une partie est absorbée sur les parois du tuyau et une autre a été rejetée à la côte à cause de fuites au début de l'émissaire, celles-ci ont été détectées par photos aériennes lors de la campagne.

FIGURE C 6-2



Le flux de concentration injecté à chaque pas de temps par le panache peut donc être caractérisé par une fonction gaussienne ou demi-gaussienne (maximum suivi d'une décroissance) dont les deux valeurs déterminantes ne sont pas précisément connues :

\* M : masse injectée

\*  $\sigma$  : écart type de la gaussienne en fonction du temps

$$\text{Flux} = \frac{M}{\sigma t \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{1}{2} t^2 / \sigma t^2}$$

D'autre part, l'épaisseur de la tache contaminée étant de 5 mètres, le flux de concentration peut être soit réparti uniformément sur l'épaisseur, soit réparti de façon gaussienne avec le maximum en surface.

Les valeurs des coefficients de diffusion  $K_h$  et  $K_z$  sont testées en comparant les résultats du modèle avec les mesures de rhodamine.

A partir des mesures de rhodamine, RAMADE a calculé le coefficient de décroissance par minute entre 70 et 240 mn après l'injection en ajustant les valeurs maximums mesurées sur les transects sur une fonction exponentielle fonction du temps :

$$C_{\max} / C_0 = e^{-k.t} \quad (t \text{ en mn})$$

Les transects n'étant pas toujours réalisés tout à fait perpendiculairement à la tache et celle-ci ayant une forme en demi-anneau, il n'est pas évident que ces valeurs mesurées soient les valeurs maximales réelles, mais elles indiquent tout au moins un ordre de grandeur.

Les tests et le calage des coefficients de diffusion sont détaillés dans l'*annexe 4*. Ils montrent que, pour une simulation de 4 heures, les résultats du modèle vont dépendre essentiellement :

- de la masse injectée donnant le niveau des concentrations
- de la répartition du flux injecté en fonction de la profondeur
- des coefficients de diffusion horizontale et verticale eux-mêmes dépendant des courants et des densités dans les différentes couches.

Les difficultés inhérentes aux campagnes de mesures effectuées sur un milieu tridimensionnel et fluctuant dans le temps font que les mesures sont trop rares et imprécises pour pouvoir déterminer les véritables valeurs de ces données. Nous en présentons seulement un exemple ici.

La masse de rhodamine injectée est prise égale à 13 kg au lieu de 20 kg réellement rejetée à la station, ce qui correspond à une perte de 35 % de matière entre l'injection et l'arrivée au bout de l'émissaire.

Les résultats de la simulation correspondante aux données de la fiche C6 sont représentés en coupes horizontales et verticales 2 heures et 4 heures après l'injection (*figures C6-3 et C6-4*). Le nuage est entraîné plus rapidement en surface et la couche contaminée s'amincit, tandis que plus en profondeur la masse rejetée reste aux abords du panache, les courants étant plus faibles.

Deux heures après l'injection, le nuage s'étale en surface sur un cercle de rayon égal à 250 mètres environ. Quatre heures après, sa forme est plus allongée, elle a une largeur de 600 à 750 mètres selon les couches et une longueur de 1300 à 1400 mètres, la limite étant donnée ici par la concentration de rhodamine égale à 1  $\mu\text{g/l}$ .

La comparaison des résultats du modèle avec les photos aériennes donnant l'extension de la tache n'est pas présentée ici, car la correspondance entre la limite de détection photographique de la tache et la concentration en rhodamine n'est pas bien connue.

## 2.2 Application du modèle au cas d'un flux continu

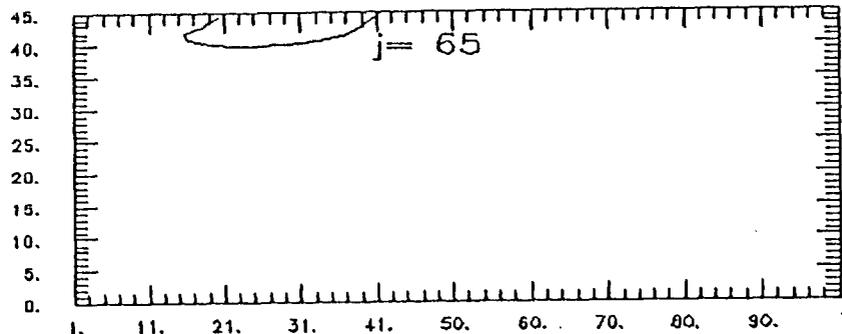
Au cours de cette mission, des prélèvements ont été réalisés et certains paramètres biochimiques ont été analysés. Sans vouloir comparer de façon précise les résultats du modèle et les mesures, il est intéressant de vérifier si les ordres de grandeur sont les bons.

Le rejet est cette fois continu, les flux de concentration introduits sont supposés constants et répartis soit dans la maille centrale, soit dans les 9 mailles correspondantes à l'émergence du panache en surface (calcul à partir des résultats du programme "jet").

Le modèle démarre avec des conditions initiales correspondant aux résultats du modèle après deux heures de simulation dans les mêmes conditions que les deux premières heures de campagne.

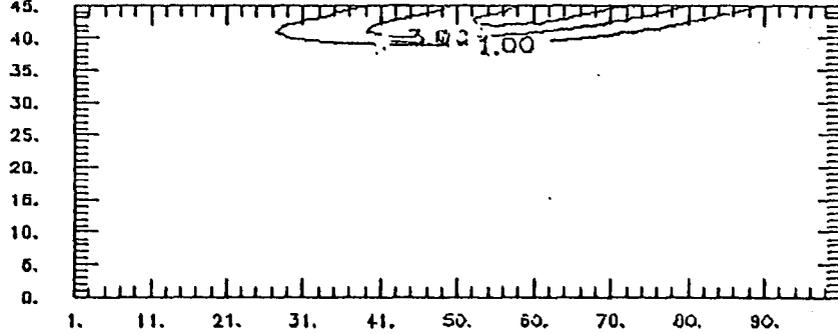
coupes selon un axe W-E

2 H

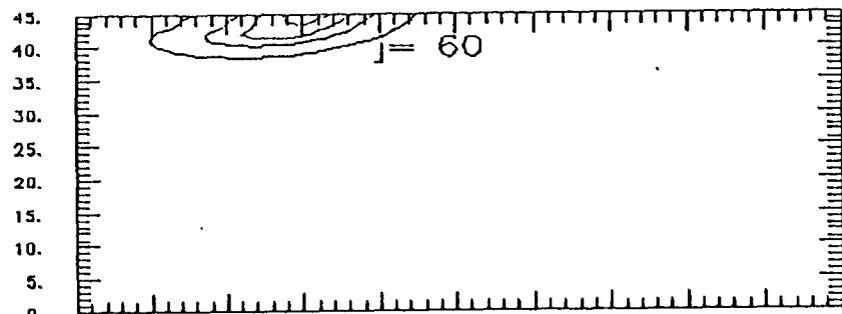


300 M  
VERS LE  
NORD

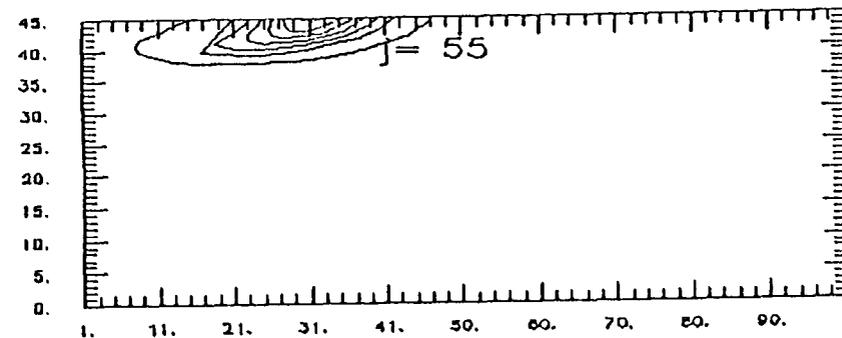
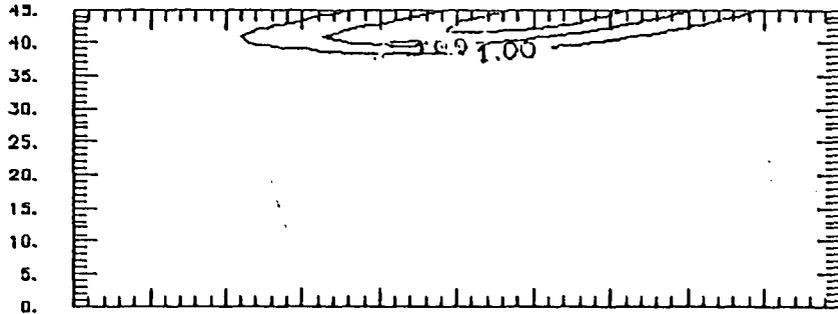
4 H



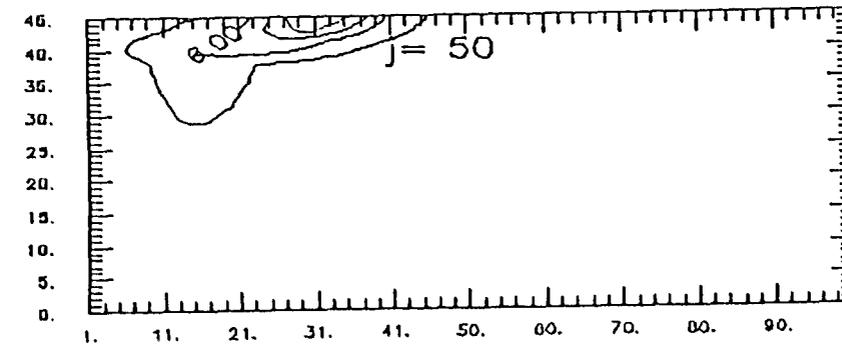
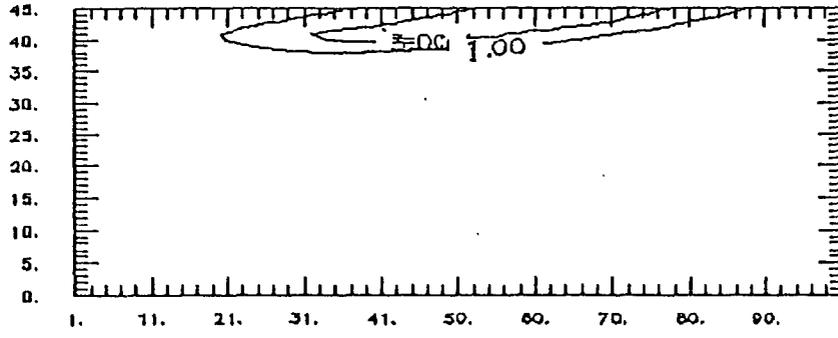
$\mu\text{G/L}$



200 M  
VERS LE  
NORD



100 M  
VERS LE  
NORD



W E  
EMISSAIRE

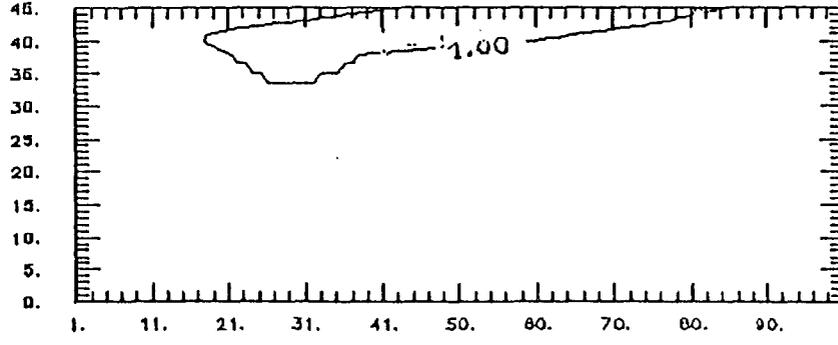
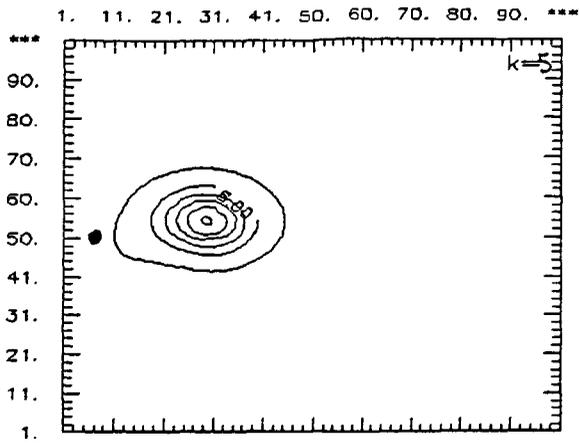


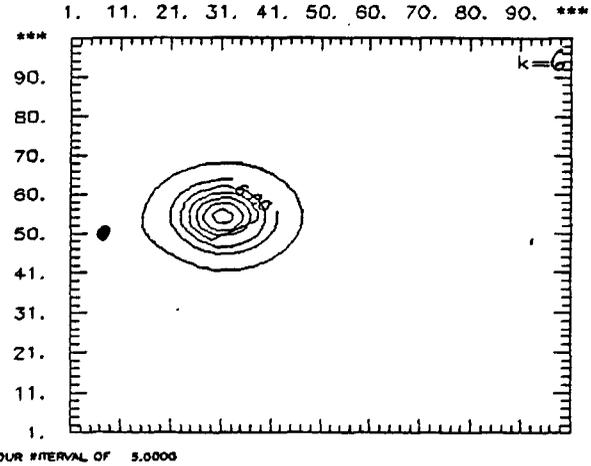
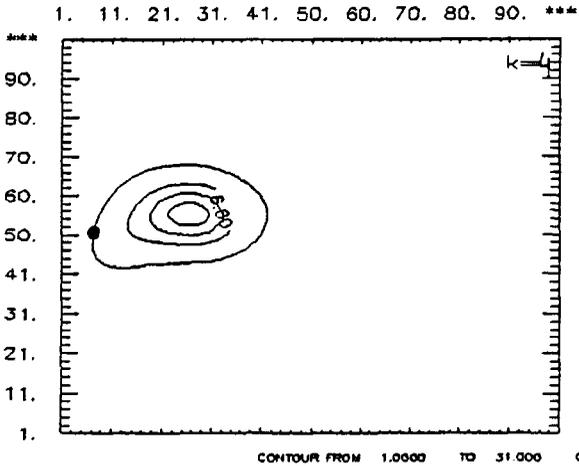
FIGURE C-6-3



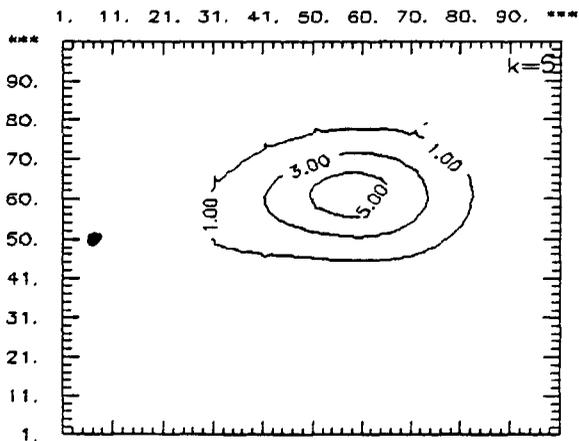
TRACE DES ISOLIGNES  
EN PLAN HORIZONTAL

au bout de : 2.0 heures

- k= 4 CONC. -4.5 m  $\mu\text{g/l}$
- k= 5 CONC. -3. m
- k= 6 CONC. -1. m



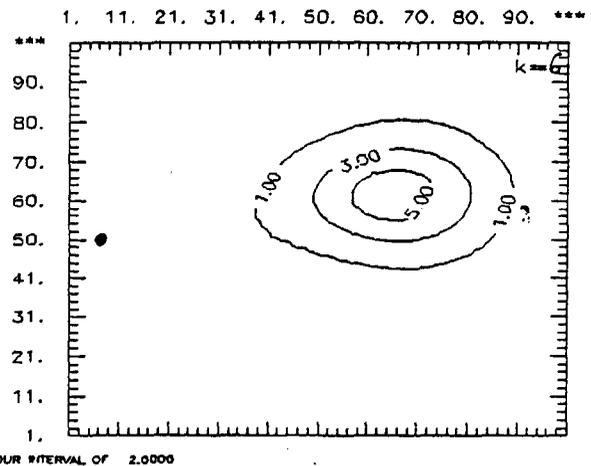
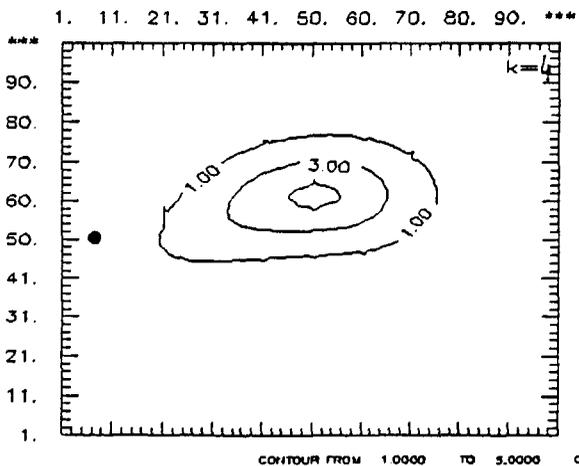
● point du rejet



TRACE DES ISOLIGNES  
EN PLAN HORIZONTAL

au bout de : 4.0 heures

- k= 4 CONC. -4.5 m
- k= 5 CONC. -3. m  $\mu\text{g/l}$
- k= 6 CONC. -1. m



Les valeurs mesurées sont comparées à celles calculées par le modèle, en terme de dilution inverse ( $C/C_0$ ),  $C_0$  étant cette fois non nulle. Les données mesurées correspondent aux dilutions calculées pour les phosphates qui sont supposés être conservatifs pendant ce laps de temps. Le modèle utilise les mêmes données pour caractériser le milieu et les mêmes coefficients de diffusion que pour le cas de l'injection ponctuelle de rhodamine (fiche C6).

Le premier prélèvement correspondant à la zone du panache donne un résultat beaucoup plus faible par la mesure que par le calcul. Les analyses précédentes ont montré que les résultats du modèle étaient imprécis dans cette zone. De plus la position du prélèvement n'est pas non plus bien définie; or le "champ proche" est une zone très turbulente dans laquelle il existe un très fort gradient, la distance au centre réel du panache peut être comprise entre 0 et 30 mètres, alors que le modèle donne une valeur moyenne sur la maille centrale de 20 mètres de côté.

Pour comparer les résultats et faire une corrélation entre les mesures et les calculs, on a utilisé pour le prélèvement 1 une valeur moyenne sur les 9 mailles voisines dans un rayon de 30 mètres, ou bien ce prélèvement a été supprimé; le deuxième prélèvement correspond à une distance au panache de 150 mètres, distance à partir de laquelle le modèle donne des résultats plus précis.

La *figure C6-5* présente les résultats. Ils sont assez satisfaisants puisque la corrélation est bonne (0.94) et la pente de la droite est proche de 1.

Les erreurs commises sur les valeurs sont de l'ordre de 10 à 20 %, deux s'en éloignent de 60 % (N5 et N9), le prélèvement N6 diffère de 134 %. Les positions des points et celle de la tâche sont visualisées sur la *figure C6-6*.

Le prélèvement à -5 mètres effectués à 525 mètres du panache donne comme le modèle un résultat plus fort en surface. A 860 mètres du panache (2h40 mn après l'injection), le modèle donne encore des valeurs doubles en surface alors que les mesures sont homogènes.

	525 m du panache		860 m du panache	
	Mesure	modèle	Mesure	modèle
en surface	0.17e-02	0.28e-02	0.14e-02	0.18e-02
à -5 mètres	0.10e-02	0.11e-02	0.14e-02	0.11e-02
rapport	1.7	2.5	1.	1.6

FIGURE C 6-5 : Coupe horizontale du nuage à 1 m  
Positions des points de prélèvements

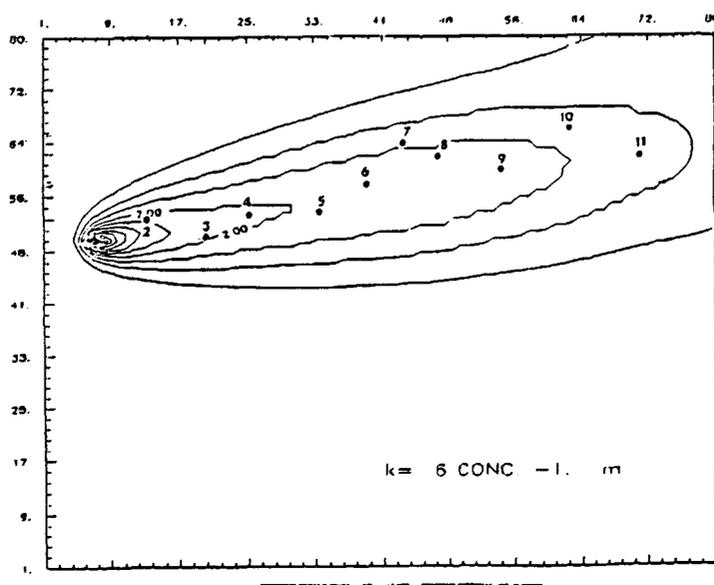
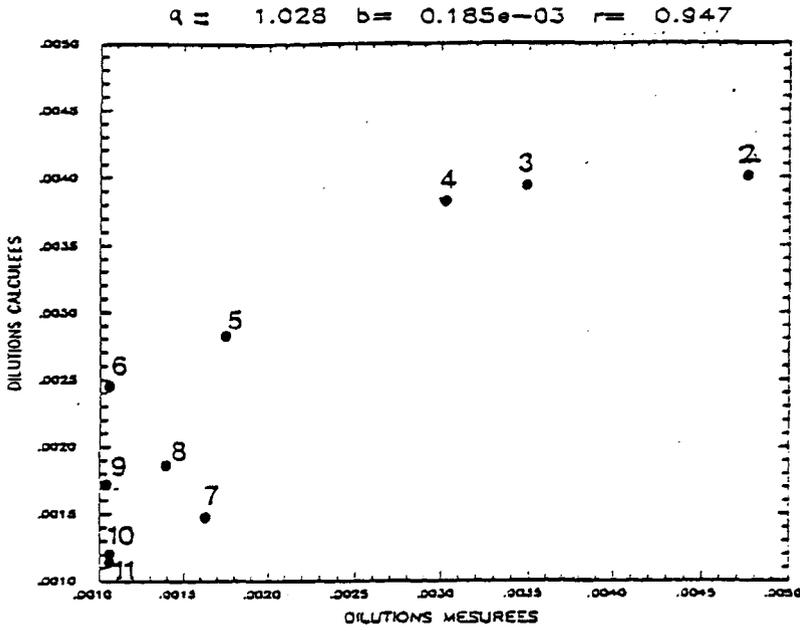
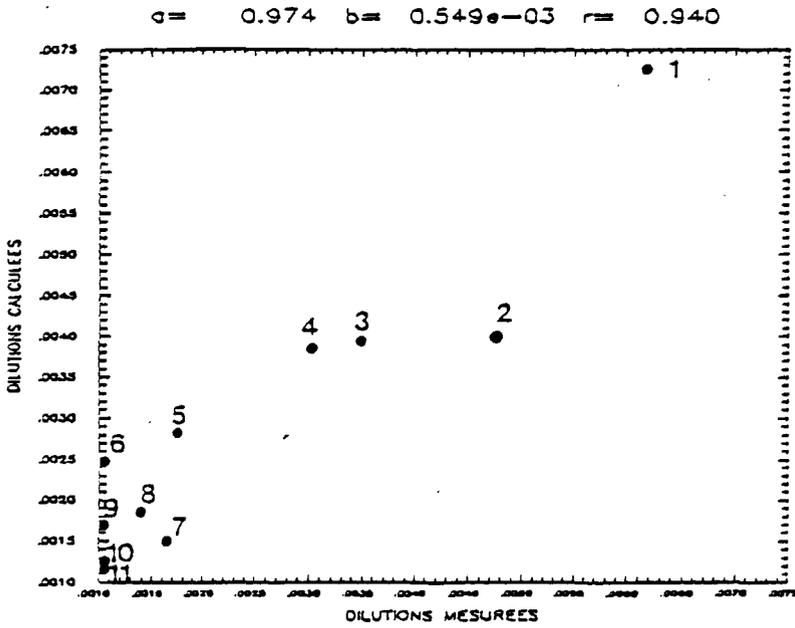


FIGURE C 6-6

Corrélation entre les résultats du modèle et les mesures (Phosphate)  
 exprimés en dilutions inverses c/co



← sans le prélèvement 1



← avec le prélèvement 1 moyen

#### IV.1.2 Campagne C7 : le 27 avril 1988

Pendant la campagne du 27 avril 1988, on a tenté de suivre l'effluent en injectant dans la station une partie des boues qui sont normalement éliminées par décantation afin notamment d'obtenir une évaluation globale des vitesses de chute. Les fortes concentrations de matières en suspension trouvées dans le milieu devaient permettre de suivre le nuage par mesure directe de turbidimétrie. Malheureusement, le nuage n'étant pas visible à l'oeil nu, il n'a pas été facile de le retrouver et de réaliser les prélèvements de façon satisfaisante. Pour l'application du modèle, seuls les 6 premiers prélèvements ont été retenus. Au-delà, les dilutions calculées à partir des matières en suspension et celles calculées à partir des phosphates ne correspondent plus. Le dernier de ces 6 prélèvements correspond à une distance de 920 mètres.

La fiche C7, en annexe 5, présente les données utilisées par les modèles pour cette application.

La campagne s'est déroulée par vent faible de Nord-Est et vraisemblablement dans les mêmes conditions de stratification quasi-nulle que le 29 avril (campagne C6).

Les courants sont également du même ordre de grandeur, mais ils ont des directions différentes (SW à -5 mètres, SE à -15m):

Le vent ne semble pas avoir augmenté pendant la durée de la campagne et les courants sont pris constants pendant toute la simulation.

#### RESULTAT DU PROGRAMME "JET"

Le panache atteint la surface avec une vitesse verticale de 0.49 m/s et un débit de 19,3 m<sup>3</sup>/s (annexe 3). La différence de densité résiduelle en surface et sur l'axe du panache est de 1.2e-04.

La dilution à 84 % est de 40, le diamètre D1 du panache est de 14,5 mètres, son épaisseur est légèrement supérieure à 5 mètres. Les vitesses radiales sont de l'ordre de 8 cm/s.

#### APPLICATION DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE

Le rejet continu est simulé par un flux de masse constant. Le modèle démarre avec des conditions initiales nulles.

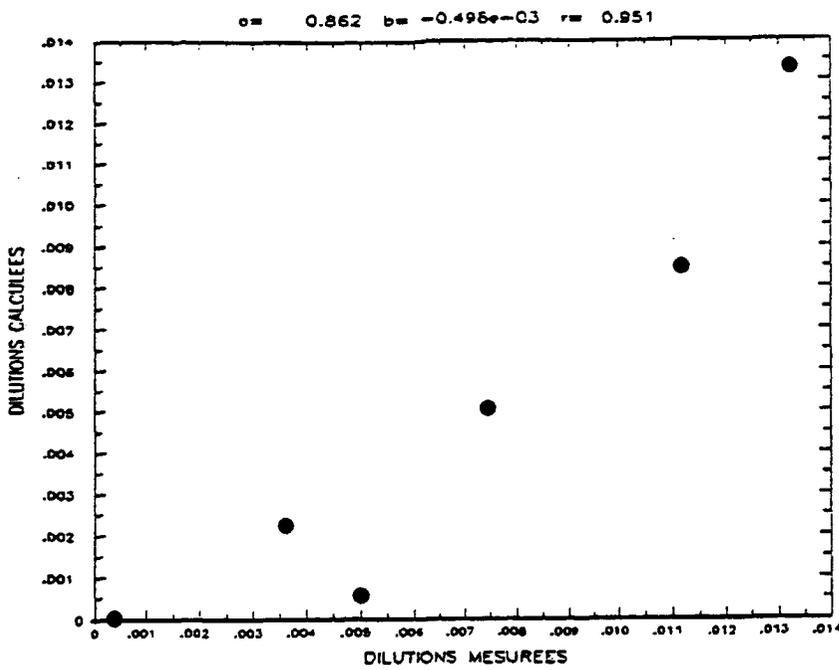
Les valeurs mesurées et calculées sont comparées à l'état quasi-stationnaire atteint au bout de 8 heures. Les données mesurées correspondent aux dilutions calculées pour les phosphates.

Comme pour le 29 avril, les courants en surface sont inconnus et ils sont estimés "au jugé", aussi bien en intensité qu'en direction. D'après les données trihoraires fournies par la Météorologie Nationale, un vent de 3m/s souffle en venant du 100° (portant au 280°) entre 9 et 12h, et du 70° (portant au 250°) entre 12 et 15 heures.

Un premier essai a été réalisé avec des courants égaux à 7 et 6 cm/s portant au 250 et 240° à 1 et 3 mètres de profondeur respectivement. Les dilutions calculées sont en général trop faibles sauf au départ (N1) et l'erreur s'accroît au cours de l'éloignement (-20 % à -80 %) (figure C7-1).

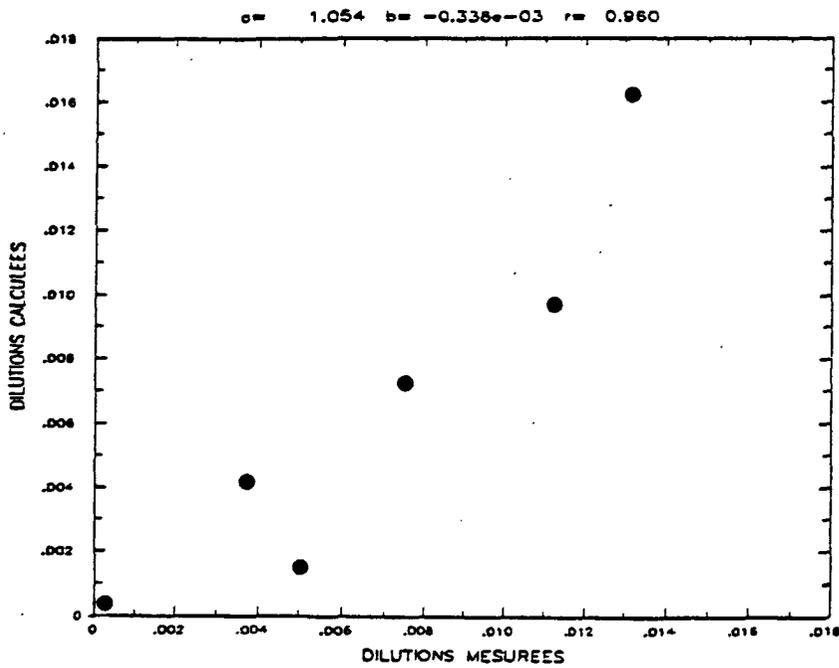
Figure C 7-1

Corrélation entre les mesures et les résultats du modèle

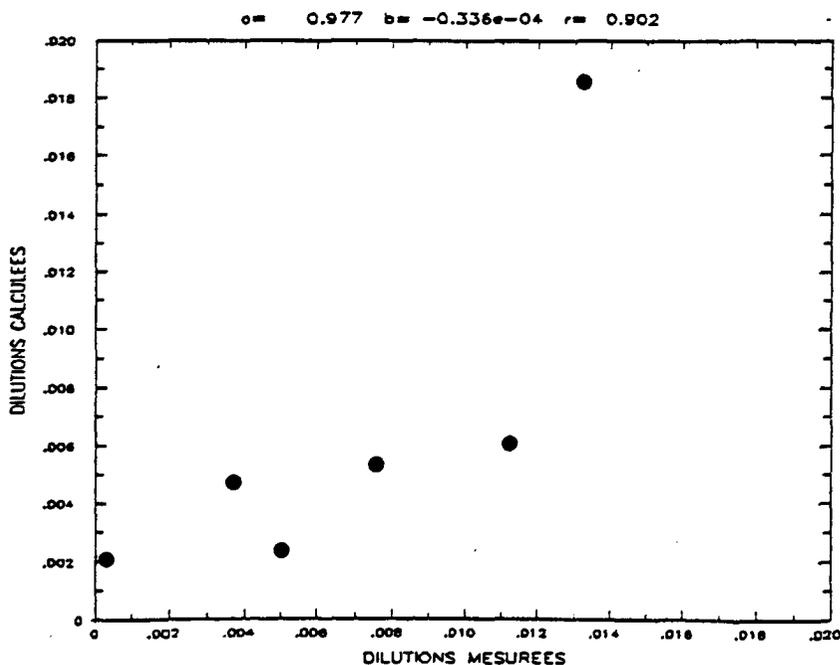


← 1er essai : courant en surface 7 et 6 cm/s portant au 250 et 240°

Dilutions inverses  
c:Co



← 2e essai : courants en surface de 5 cm/s portant au 240°



← 3e essai : courants en surface de 5 cm/s portant au 225°

En choisissant des courants plus faibles, égaux à ceux mesurés à 7 mètres de profondeur (5 cm/s portant au 240°), la comparaison est meilleure sauf pour le premier point.

Le tracé du nuage en coupe horizontale à -1 mètre avec les positions de prélèvement (*figure C7-2*) montre que les derniers points sont placés en dehors de la tâche.

Un dernier essai a permis de tester les résultats en modifiant la direction des courants de 15°, les points de prélèvement étant alors placés dans l'axe de la tâche. Les concentrations calculées sont alors trop faibles puis trop fortes quand on s'éloigne du panache.

Les résultats du deuxième essai semblent les meilleures. Les erreurs sont inférieures à 15 % sauf pour N1 (+ 20 %) et surtout N5 (-70 %).

Campagne du 27 Avril 1988

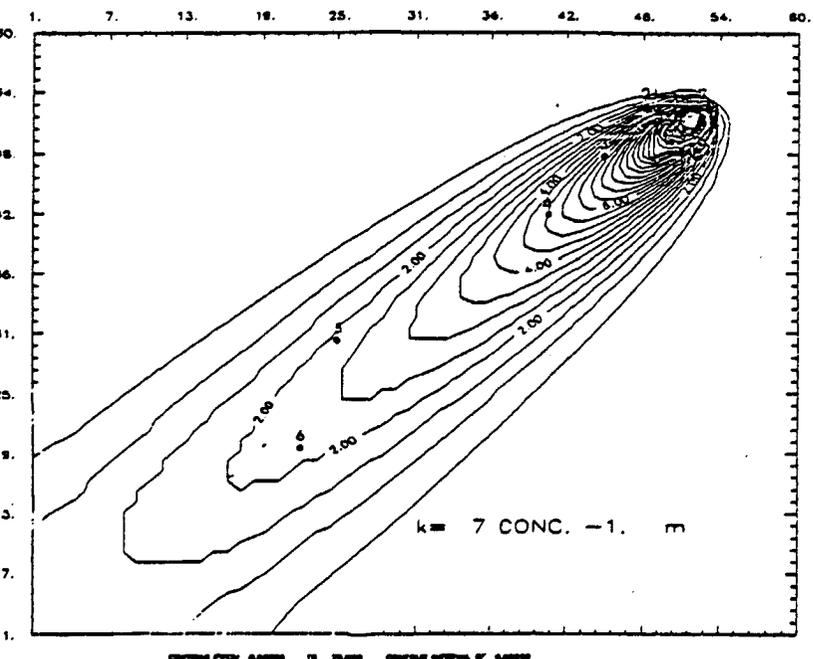
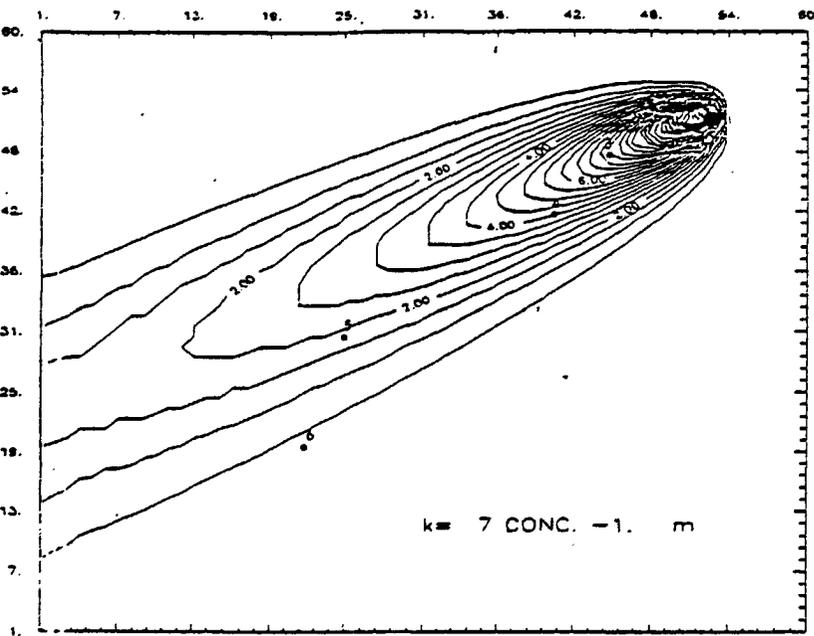
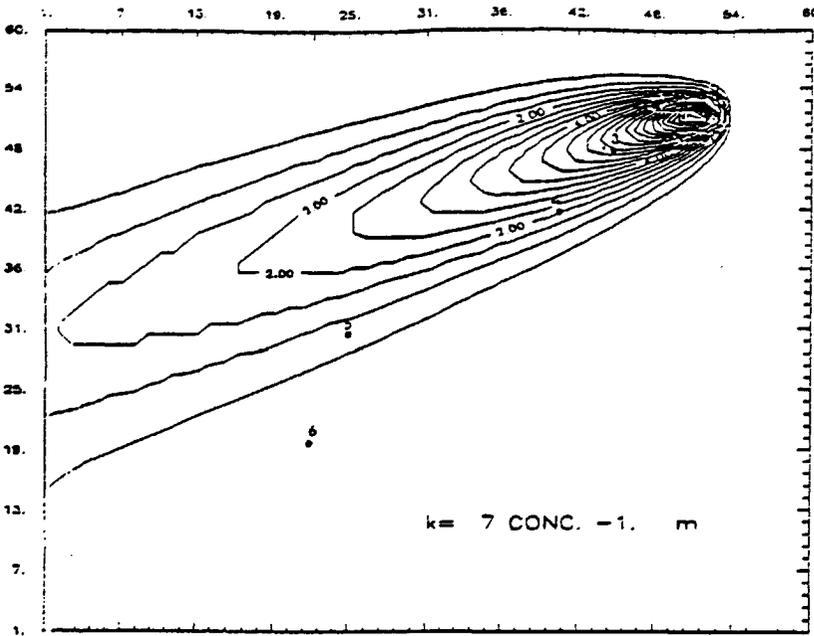
Figure C 7-2

Coupes horizontales du nuage pour les 3 essais

1er essai :  
courant en surface de 7 et 6 cm/s  
portant au 250° et 240°

2e essai :  
courants en surface  
de 5 cm/s portant au 240°

3e essai :  
courants en surface de 5 cm/s  
portant au 225°



### IV.1.3 Campagne C2 : le 16 octobre 1986

La campagne du 16 Octobre 1986 a été réalisée en marquant les particules de l'effluent avec un traceur radioactif: l'Au<sup>198</sup>. Elle a donné lieu à un rapport du CEA (BRISSET 1986).

Des prélèvements ont été effectués par hélicoptère en tentant de se guider à l'aide des mesures de radioactivité; mais l'état de la mer, le vent assez important et quelques problèmes techniques ont rendu difficile le positionnement du préleveur en surface. Les résultats des analyses physico-chimiques ne seront pas exploités ici. Seules les dilutions mesurées par le CEA seront utilisées.

La campagne s'est déroulée par vent d'Est croissant de 3 à 5 m/s et une mer agitée. Les courants ont été mesurés à -7 mètres et au fond. Le courantomètre en surface était défectueux. Le profil de densité est très homogène. Le panache remonte jusqu'à la surface.

Les tracés d'isoconcentration reportés par le CEA (*figure C2-1*) montrent des taches très étalées transversalement par rapport à l'axe principal de transport.

Ces résultats ne peuvent être reproduits par le modèle que si celui-ci prend en compte la rotation du courant de surface au cours du temps (il portait au Nord-Ouest au début de la campagne et au Sud-Sud-Ouest trois heures après). Les résultats finaux à comparer avec les mesures sont calculés en relevant les concentrations maximales rencontrées en chaque point entre le début et la fin de la campagne.

En effet, les lignes d'isodilution tracées par le CEA sont le résultat de transects effectués pendant toute la durée de la campagne. Si les courants sont constants, les résultats correspondent bien à un état stationnaire et les mesures faites au début et à la fin sont semblables ou égales si l'état stationnaire est rapidement atteint. Par contre, si le courant tourne, comme cela semble avoir été le cas ici, le nuage de pollution tourne également et les mesures ne correspondent plus à un état stationnaire.

Il semble que le CEA ait reproduit la somme des différentes positions prises par la tache au cours du temps, ce qui nous donne cette forme très élargie du nuage et qui correspond à l'enveloppe des concentrations rencontrées tout au long de la campagne.

L'exploitation des résultats à l'aide du modèle et en terme de calage des coefficients de diffusion devient donc difficile, d'autant plus que les courants de surface ne sont pas connus précisément.

Un fait marquant de cette campagne est le fait d'avoir pu observer une apparition de traceur à -12 mètres à environ 260 mètres du point d'émission et 150 minutes après le début de l'injection. Cette "descente" du nuage vers le fond peut être due soit à une diffusion verticale importante, soit à un phénomène de floculation et chute des particules.

#### DONNEES DE L'EFFLUENT ET DU MILIEU RECEPTEUR

Les données injectées dans les modèles sont présentées dans la fiche C2 (*annexe 5*).

Le débit de l'effluent est égal à 800 m<sup>3</sup>/h. Les valeurs de courant sont extrapolées à partir des seules mesures à -7 mètres et au fond. On a observé à -7 mètres un courant augmentant de 4 à 12 cm/s et tournant de l'Est au Sud-Est pendant les 3 heures de mesures après l'injection. Le profil de densité a été mesuré par sonde T.S le jour même dans l'après-midi. On observe une légère stratification entre 0 et 5 mètres de profondeur ( $1,5 \cdot 10^{-04}$ ).

# RADE DE TOULON

## détection du nuage radio-actif

### 16 OCTOBRE 1986

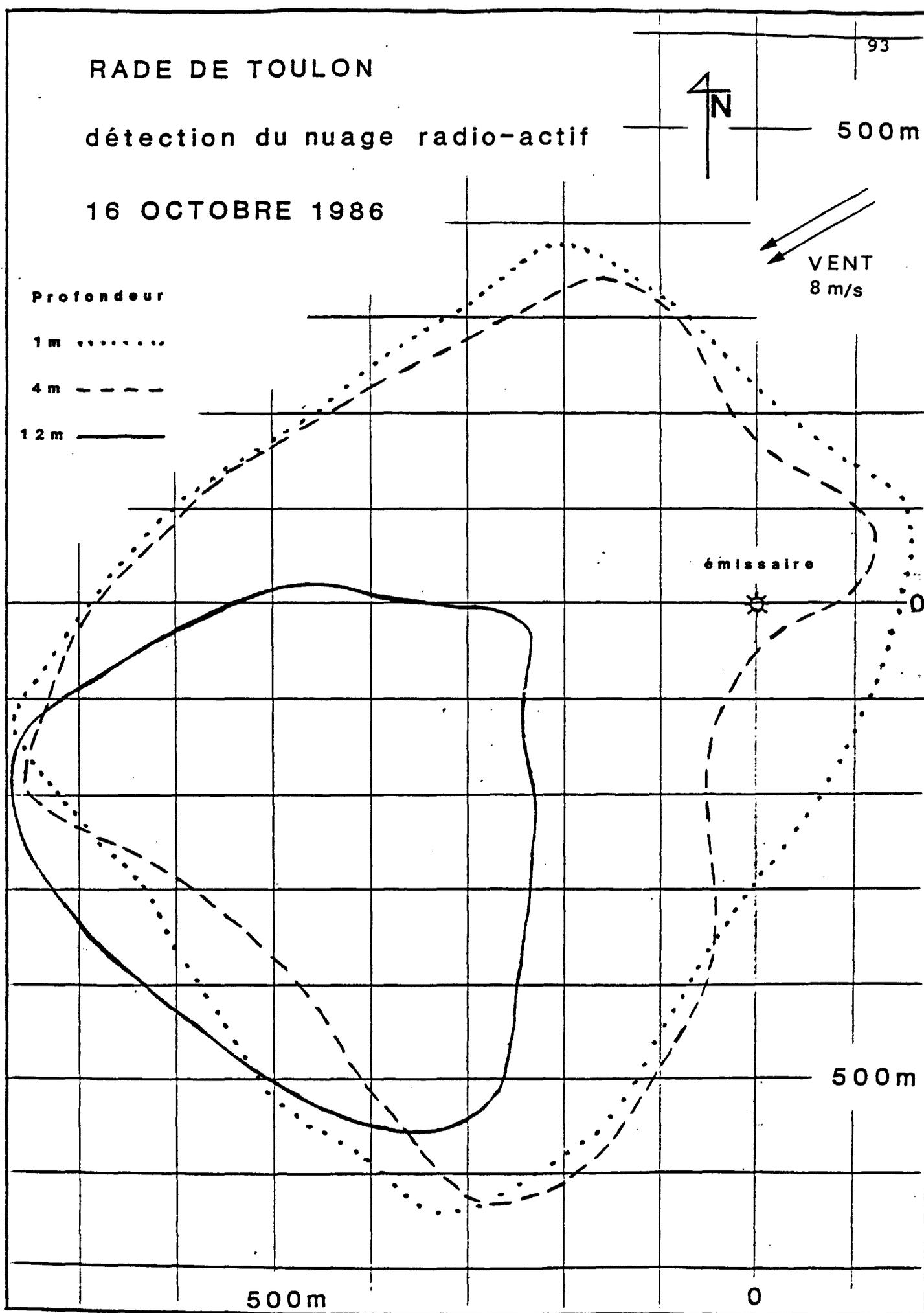


FIGURE C 2-1 : MESURES

## APPLICATION DES MODELES

### RESULTAT DU PROGRAMME "JET"

Le panache atteint la surface avec une vitesse verticale de 0.5 m/s et un débit de 18,5 m<sup>3</sup>/s (*annexe 3*). La différence de densité résiduelle en surface et sur l'axe du panache est de  $5 \cdot 10^{-5}$ .

La dilution à 84 % est de 60, le diamètre D1 du panache est de 14,5 mètres.

L'épaisseur du nuage étalé en surface et sa vitesse horizontale radiale varient beaucoup selon le profil de densité donné en surface. Avec le profil mesuré, l'épaisseur est importante, égale à 7 mètres; la vitesse radiale est par conséquent faible (6 cm/s). Si on considère que la stratification dans les premiers mètres sous la surface est résorbée par l'effet dynamique du panache, l'épaisseur est moindre (4,5 mètres), la vitesse horizontale est égale à 9 cm/s. D'après les mesures et les résultats du modèle, il semble que la deuxième solution soit plus réaliste.

### APPLICATION DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE HORIZONTAL

Le rejet continu est simulé par un flux de masse constant. Le modèle démarre avec des conditions initiales nulles. Les résultats en concentration sont stockés toutes les demi-heures. La comparaison avec les tracés du CEA est réalisée en créant un nouveau fichier représentant les valeurs maximales des concentrations rencontrées en chaque point.

Un exemple est donné sur la *figure C2-2* qui présente les lignes d'iso-dilution à -1,5 mètre de profondeur, après 1 heure, 2 heures et 3 heures de simulation. Le nuage résultant de cette simulation et qui sera comparé aux mesures du CEA est présenté sur la quatrième figure (maximums).

Le courant en surface étant inconnu, sa valeur et sa direction sont approximés en fonction du temps à partir de la mesure du courant à -5 mètres.

Plusieurs essais ont été réalisés, en testant les valeurs des coefficients, des courants et des conditions aux limites dans le "champ proche" (*annexe 4*).

D'après ces tests, la manière de répartir horizontalement le flux entrant dans le milieu par le rejet n'est pas importante.

Pour obtenir l'apparition de traceur dans les couches profondes, la meilleure combinaison pour le coefficient de diffusion verticale et la vitesse de chute semble être :

- $K_z$  maximal = 0,003 m<sup>2</sup>/s;  $K_z$  minimal = 0,0001 m<sup>2</sup>/s
- $w_c$  = 0,3 mm/s.

D'autre part les résultats sont sensibles à la valeur des courants donnés dans les couches sub-superficielles (10-12 mètres).

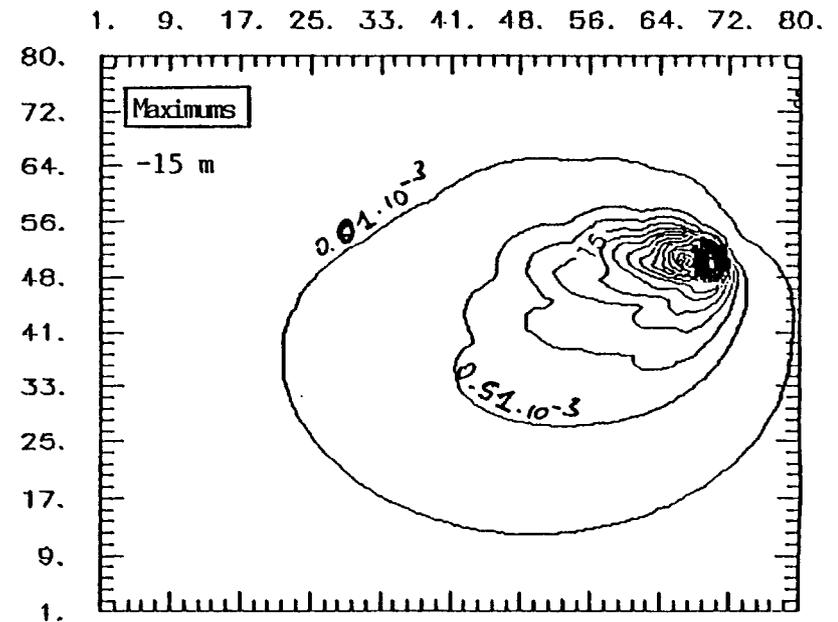
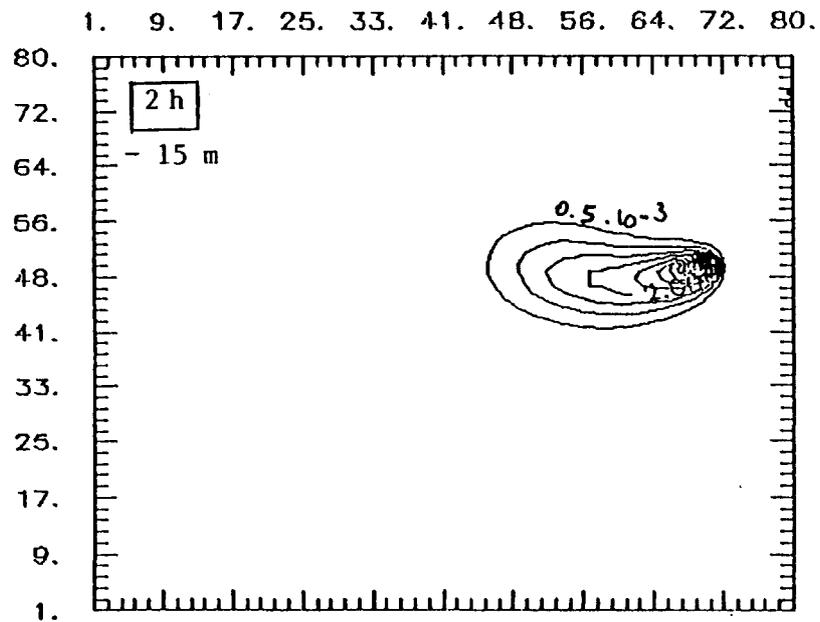
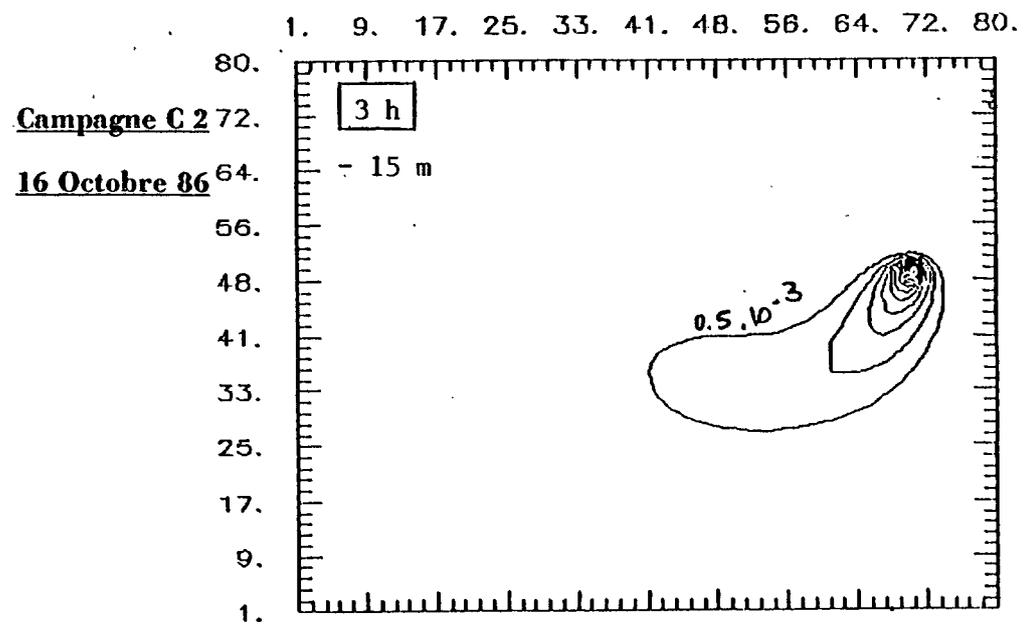
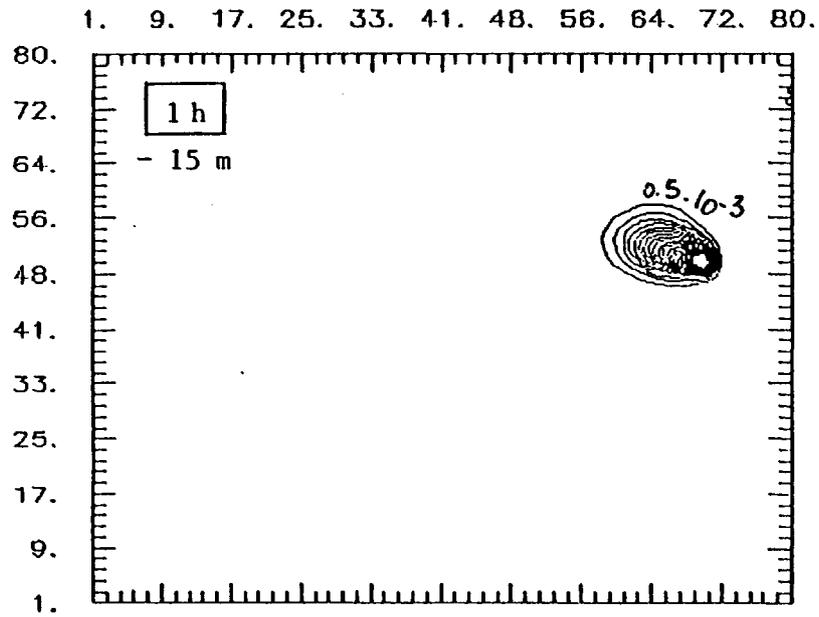


Figure C 2-2 : Isodilutions en coupe horizontales - Exemple du traitement des résultats à 1h, 2h et 3h pour obtenir les maximums dans la zone d'étude 95

#### IV.1.4 Campagne C4 : le 19 juin 1987

La campagne du 19 Juin 1987 est une campagne de marquage de l'effluent en surface, au niveau de l'émergence du panache. Un traceur radioactif, le Technetium 99, a été utilisé ; contrairement à l'Or qui s'attache aux particules du rejet, le technetium est un marqueur du dissous. L'effluent en surface a également été repéré par une injection instantané de rhodamine, qui a permis, conjointement à la sonde de detection radioactive, de suivre le transport et le mélange du nuage pendant trois heures et sur une distance de 1,5 kilomètres.

Des prélèvements d'eau à partir d'un petit bateau qui sillonnait la zone, ont été réalisés et les concentrations de certains paramètres chimiques et surtout bactériologiques ont été mesurées. L'analyse de ces mesures a permis, en comparant les dilutions de paramètres conservatifs et de paramètres bactériologiques d'étudier la loi de disparition de ces derniers en fonction du temps et de la luminosité. Cette loi a été utilisée dans le modèle de transport et mélange afin de vérifier la bonne adéquation des résultats du modèle avec les mesures.

#### DONNEES DE L'EFFLUENT ET DU MILIEU RECEPTEUR

Les données injectées dans les modèles sont présentées dans la fiche C4 (*annexe 5*).

Le débit de l'effluent est  $756 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Après plusieurs jours de vent d'Ouest assez réguliers avec des maximums jusqu'à 20 m/s dans l'après midi, le vent s'est affaibli le jour de la campagne, instable le matin (2 à 4 m/s), un peu plus fort l'après midi (4 à 8 m/s), dirigé vers l'Est/Sud-Est.

Alors que pendant les jours précédents, la radiation lumineuse était régulière avec un maximum à environ  $95 \text{ mW/cm}^2$ , la couverture nuageuse était plus importante le 19 juin, et la radiation plus irrégulière ne dépasse pas  $66 \text{ mW/cm}^2$ .

Les courants mesurés grâce à des courantomètres placés en surface, à -7 mètres et à -15 mètres, sont relativement réguliers et stables, dirigés vers l'Est, légèrement Sud. En surface, le courant atteint 9 cm/s en début de matinée, puis décroît pendant la campagne jusqu'à 6 ou 7 cm/s. A 7 et 15 mètres de profondeur, le courant est plus faible (4 à 6 cm/s), sensiblement dans la même direction.

Le milieu était stratifié jusqu'au 15 juin, avec une température en surface de  $18^\circ\text{C}$  et au fond de  $13-14^\circ\text{C}$ . Les vents d'Ouest, soufflant à partir du 15 juin ont homogénéisé la colonne d'eau, et le 19 juin, jour de la campagne, la température est pratiquement constante de la surface au fond, entre  $13$  et  $14^\circ\text{C}$ .

#### APPLICATION DES MODELES

Comme précédemment, les deux modèles, de remontée du panache et de transport et mélange, ont été appliqués en utilisant en données d'entrée les mesures effectuées ce jour.

## RESULTAT DU PROGRAMME "JET"

Le panache atteint la surface avec une vitesse verticale de 0,4 m/s et un débit de 16 m<sup>3</sup>/s (*annexe 3*). La dilution à 84 % est de 54, le diamètre D1 du panache est de 8 mètres, son épaisseur est de 5 à 6 mètres.

### APPLICATION DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE HORIZONTAL

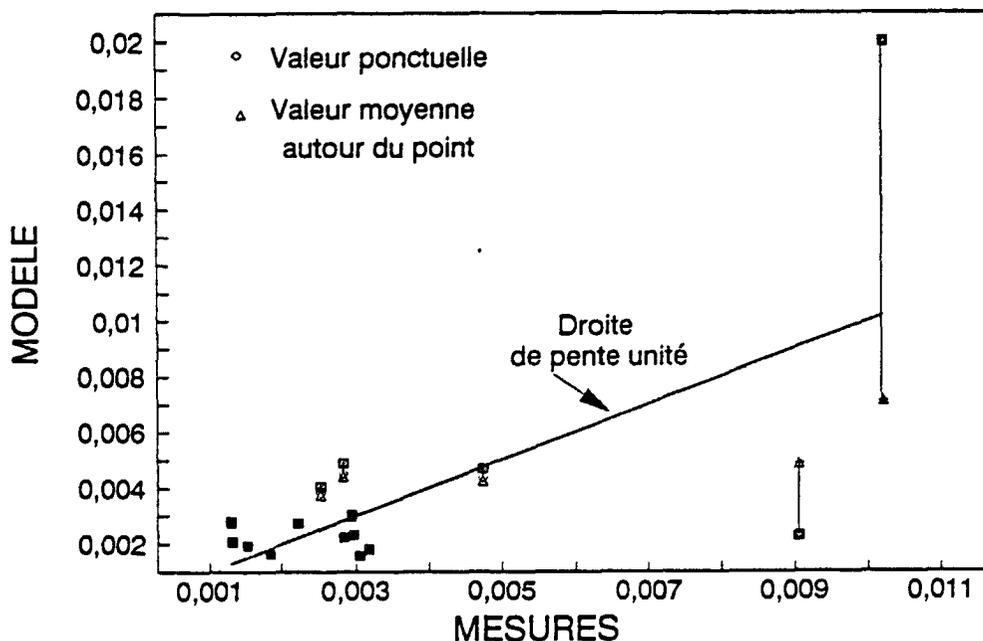
Deux applications ont été réalisées :

- l'une pour un paramètre conservatif tel que les nitrates, en tenant compte du bruit de fond, et après avoir atteint un état presque stationnaire (compte tenu du fait que les courants varient légèrement pendant la campagne).
- l'autre pour un paramètre non conservatif tel que les streptocoques fécaux, en régime non stationnaire; la disparition des bactéries en fonction du temps et donc de la distance est calculée à partir d'une loi de mortalité dépendant de la radiation solaire. (Par erreur sur les dilutions de culture, les coliformes fécaux n'ont pas pu être mesurés).

Le rejet continu est simulé par un flux de masse constant. Le modèle démarre avec des conditions initiales correspondant pour l'ammonium à un bruit de fond dans la zone ( $0,5 \cdot 10^3$  mg/l).

La comparaison des résultats du modèle avec les mesures en terme de dilution inverse des nitrates est montrée sur la *figure C4-1*. Pour les fortes concentrations, c'est à dire dans la zone proche du panache, l'incertitude est grande à cause du fort gradient. Les valeurs du modèle sont très différentes selon la maille du modèle que l'on choisit pour représenter la mesure; celle-ci n'a pas non plus une position très précise par rapport à l'émergence du panache et rend compte de l'hétérogénéité du milieu dans cette zone.

FIGURE C4-1 DILUTION INVERSE C/C0 des NITRATES  
CAMPAGNE DU 19 JUIN 1987



Pour modéliser le comportement des bactéries, le modèle est utilisé de la même manière, avec un bruit de fond nul, les concentrations dans le milieu sont calculées en multipliant les dilutions  $C/C_0$  par  $C_0$  concentration dans l'effluent à la sortie de l'émissaire ( $C_0 = 10^7$  SF/100ml).

Sans tenir compte de la mortalité des bactéries, la comparaison des résultats du modèle avec les mesures montre une mauvaise corrélation. Les valeurs calculées par le modèle sont trop fortes par rapport aux mesures, qui, elles, tiennent compte de la dilution et de la mortalité (*figure C4-2*)

Si on introduit dans le modèle une loi de disparition des bactéries (POMMEPUY *et al*), fonction de la radiation lumineuse, on obtient les résultats de la *figure C4-3*. La radiation lumineuse est prise constante égale à  $535 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . La loi de disparition utilisée est la suivante :

$$\text{Log}_{10}(kd) = 1,211 \cdot \text{Log}_{10}(I(z)) - 3,929$$

$I(z)$  étant l'intensité lumineuse disponible à la profondeur  $z$   
 $I_0$  étant l'intensité lumineuse disponible en surface

$$I(z) = I_0 e^{-0,114z}$$

On constate une meilleure corrélation; les concentrations calculées sont globalement plus faibles que les mesures. Mais si on multiplie les concentrations calculées par une concentration  $C_0$  plus forte, on peut remonter légèrement tous les points et obtenir un meilleur ajustement. La concentration  $C_0$  de  $10^7$ , provient de 2 ou 3 mesures ponctuelles, il n'est pas impossible que cette concentration ait été globalement plus forte pendant la campagne.

Ces résultats sont sensibles aux courants, à la radiation solaire, à  $C_0$ , et toutes ces données sont assez variables dans le temps. Or elles sont utilisées dans le modèle en valeurs moyennes, avec une incertitude non négligeable. Néanmoins, sans multiplier les essais, il est intéressant de voir que le modèle reproduit bien la dilution progressive du rejet au fur et à mesure que l'on s'éloigne du panache.

La loi de disparition des streptocoques fécaux a été extrapolée et calée à partir des mesures de plusieurs campagnes, dont la campagne du 19 juin. Il est donc logique de retrouver une décroissance voisine; cet essai servant uniquement de vérification.

### CAMPAGNE C4 DU 19 JUIN 1987

FIGURE C4-2 DILUTION BACTERIES SANS DISPARITION

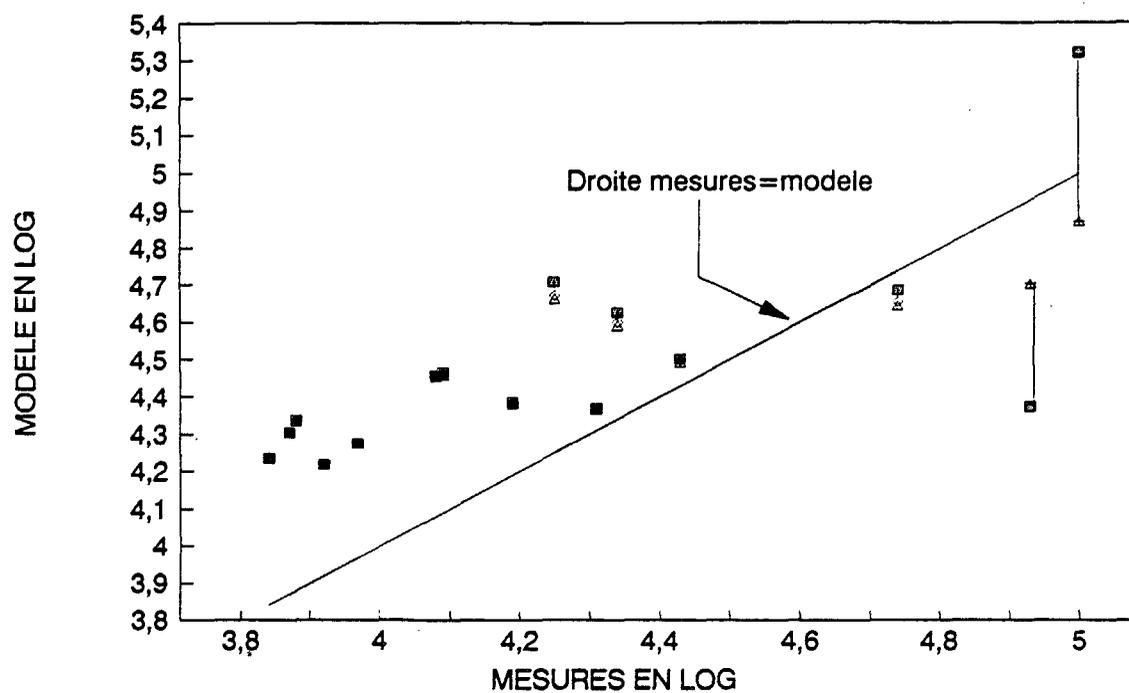
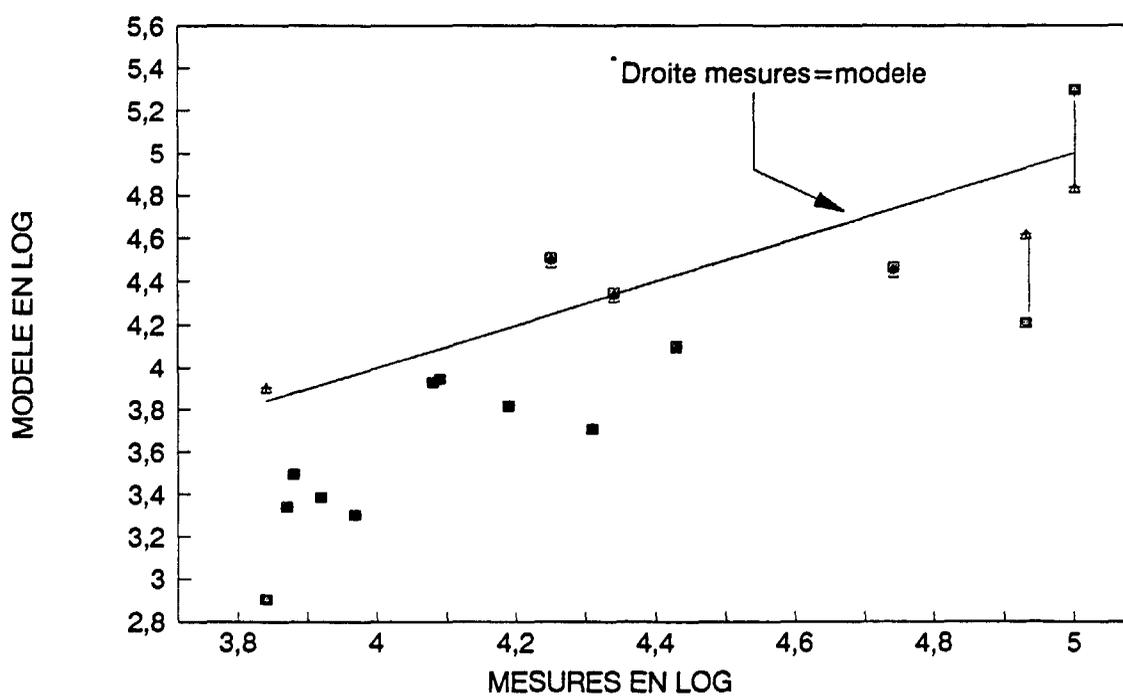


FIGURE C4-3 DILUTION BACTERIES (C0=1.e+07)



## IV.2. CAMPAGNES EN MILIEU STRATIFIE

Les modèles ont été appliqués aux campagnes en milieu stratifié. Le panache est bloqué en profondeur; le nombre et l'épaisseur des couches horizontales sont choisis de telle sorte que le gradient de concentration et la zone de captage du nuage soient mieux représentés. Le maillage horizontal reste de 20 mètres. Le coefficient de diffusion verticale est calculé de la même manière en fonction de la stratification. Le coefficient de diffusion horizontale est choisi beaucoup plus faible. Cette forte diminution du coefficient  $K_h$  est explicable par le fait que la dispersion est plus faible qu'en surface, les gradients de courant dans la masse d'eau profonde étant moins prononcés.

### IV.2.1 Campagne C1 : 19 juin 1986

La campagne du 19 JUIN 1986 a été la première campagne expérimentale réalisée sur le site de TOULON-EST dans le cadre de notre étude. Le nuage a été suivi en injectant pendant une heure environ dans la station d'épuration de l'Or radioactif ( $Au^{198}$ ), qui marque les particules solides du rejet.

Quatre sondes ont été placées en chapelet sur une même verticale à des profondeurs fixes : -1m, -5m, -15m et -30 mètres, et un bateau détecteur les a traînées à travers la zone d'étude.

Les résultats de cette campagne ont donné lieu à un rapport du CEA (BRISSET 1986). Les mesures des paramètres du milieu et du rejet qui ont été réalisées conjointement sont présentées dans un rapport (ROMANA 1986).

Le 19 Juin 1986, le temps était calme et sans vent. Vers 11h, une brise de mer s'est levée avec des vents de Sud-Sud-Est ( $150^\circ$ ), faibles, de l'ordre de 2 à 4 m/s.

Des profils de sonde T.S ont été effectués le 17 et 18 Juin vers 14 heures. La densité croît linéairement de la surface vers le fond, avec deux légers décrochements vers 5 et 20 mètres (*figure C1-1*). La différence de densité entre la surface et le fond est de 1,2.

Deux courantomètres étaient mouillés dans la zone, l'un en surface, l'autre au fond. La chaîne de thermistances du fond étant endommagée, le profil de température n'a pas été mesuré sur toute la profondeur.

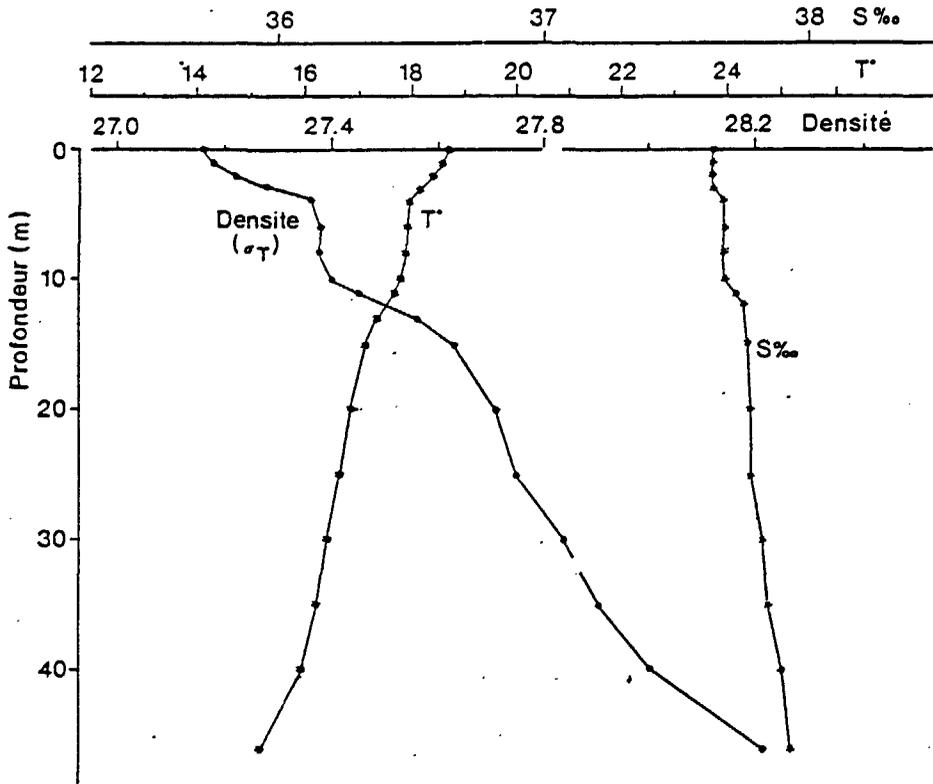
Les courants mesurés en surface sont faibles, 4 à 6 cm/s, dirigés vers le Nord-Nord-Ouest. Les courants au fond sont inférieurs au seuil de démarrage du courantomètre.

Les mesures de radioactivité montrent une concentration maximale à -15 mètres, environ 5 fois supérieure à celle à -5 mètres et 150 fois plus forte que celle à -1 mètre.

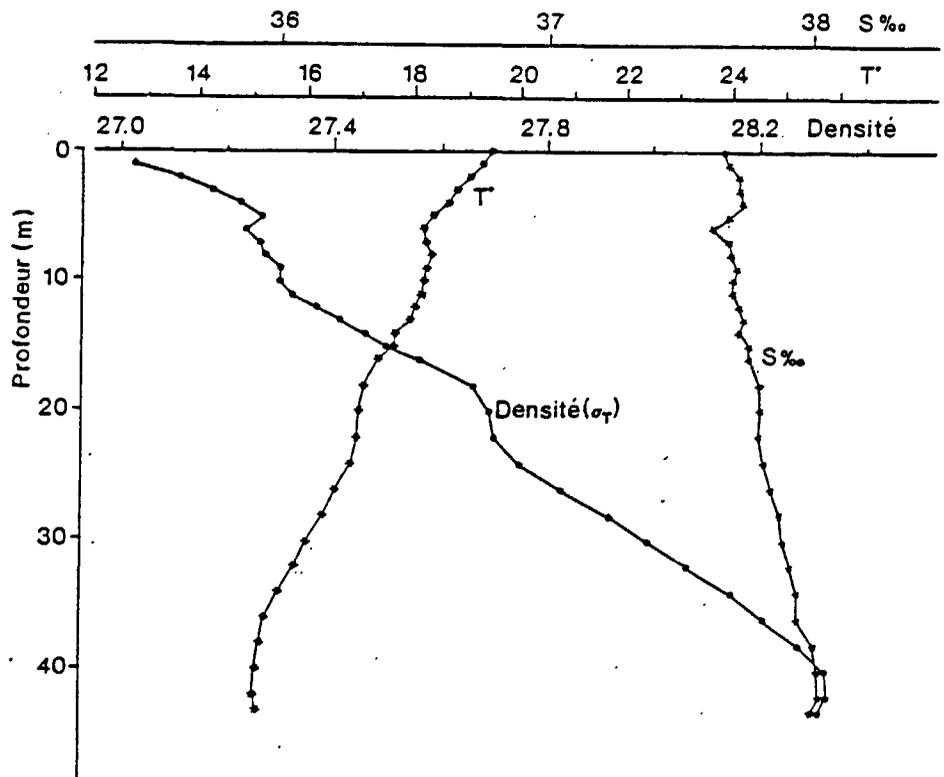
Les deux modèles, "JET" et modèle en couches ont été appliqués en utilisant les données présentées sur la fiche C1 (*annexe 5*).

Site : EMISSAIRE / Date : 17 Juin 1986  
-14h 30-

FIGURE C 1-1



Site : EMISSAIRE / Date : 18 Juin 1986  
-14h-



## RESULTAT DU PROGRAMME JET

Avec un débit de 0,12 m<sup>3</sup>/s et une stratification de densité de 1,2, le panache est capté en profondeur. La profondeur de blocage et l'épaisseur du nuage initial peuvent varier en fonction des courants qui sont assez mal connus en profondeur. En utilisant les directions indiquées par les mesures de radioactivité, on obtient les résultats suivants (*annexe 3*) :

cote de blocage : 15 mètres  
hauteur du dôme : 6 mètres  
épaisseur du nuage initial : 3 mètres  
vitesse horizontale : 7 cm/s  
diamètre du panache avant étalement : 14 mètres  
diamètre du panache après étalement : 43 mètres  
dilution à 84% : 49

La plus grande partie du panache s'écoule donc vers 15 mètres de profondeur. Un dôme de hauteur 6 mètres entraîne le rejet jusqu'à -9 mètres environ sous la surface.

Les mesures de radioactivité ayant détecté de l'Au<sup>198</sup> à - 5 mètres et même jusqu'en surface, il est probable que la remontée du panache se fait par bouffées successives qui entraînent le percement de la stratification par instants, et une hauteur du dôme variable. Les résultats du programme "JET" sont par comparaison des résultats statistiques exprimés en valeurs moyennes.

## APPLICATION DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE HORIZONTAL

Le rejet d'Au<sup>198</sup> a duré une heure. Le modèle démarre avec des conditions initiales nulles.

D'après le modèle "JET", le flux de masse apporté par le rejet se répartit sur une couche de 3 mètres d'épaisseur, l'effluent forme un dôme, mais retombe et s'écoule ensuite en profondeur. D'après les mesures, une partie, quoique faible de l'effluent, monte jusqu'en surface et est capté par les courants horizontaux, s'étalant alors dans des directions différentes selon la profondeur. La condition limite à introduire dans le modèle en couches est donc donnée par le flux total injecté par le rejet, et que l'on répartit plus ou moins arbitrairement selon la profondeur, avec un maximum vers -15 mètres.

Comme pour la campagne C2 en milieu homogène, les mesures du CEA ont été réalisées en continu à partir du moment où le nuage est formé. Etant donné que les courants sont faibles, l'état stationnaire n'est probablement pas atteint, et les concentrations dans le nuage varient en fonction du temps. Il est donc difficile de comparer les résultats du modèle et les mesures de radioactivité.

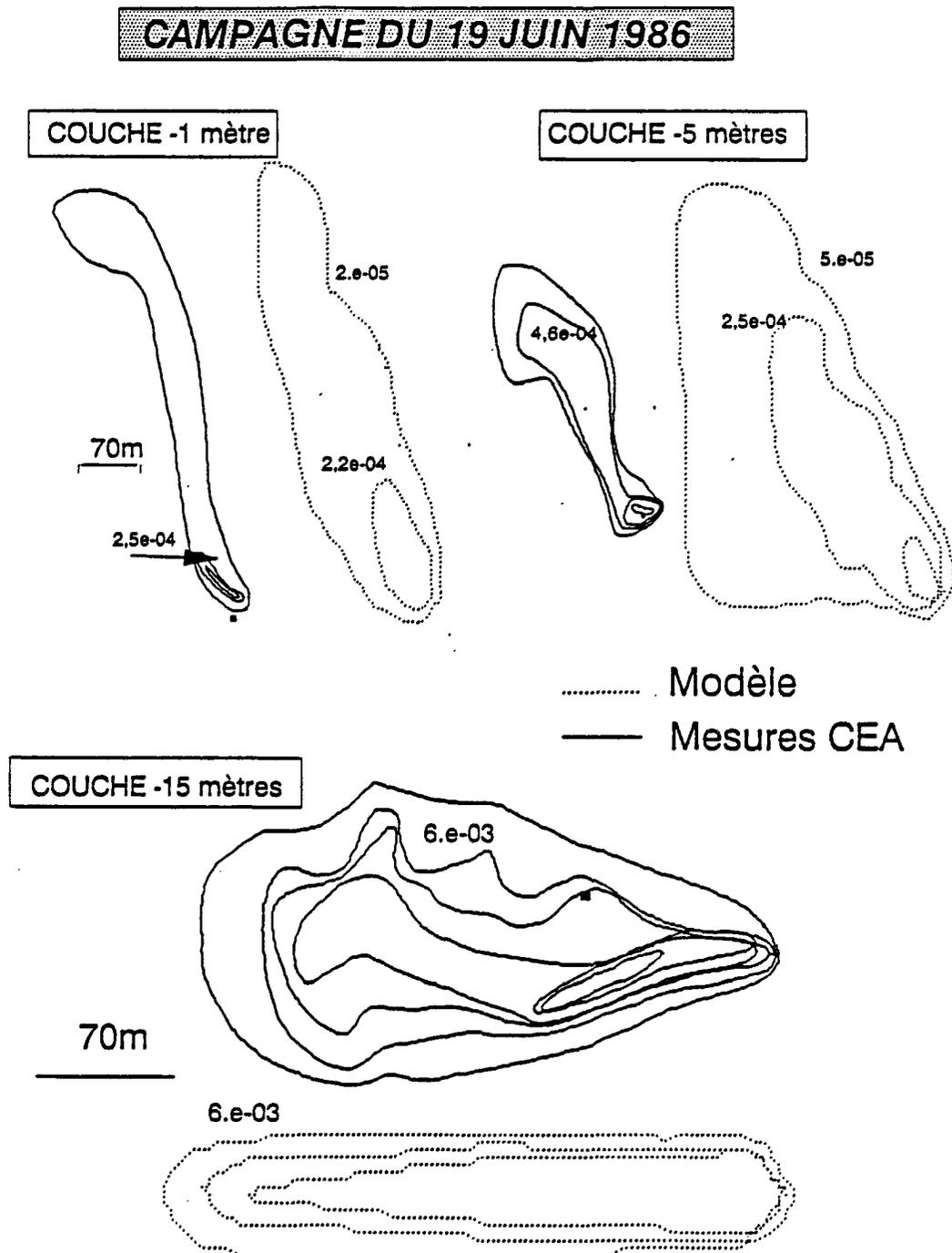
D'autre part, on a vu, qu'étant donnés le maillage horizontal du modèle et l'imprécision sur la condition à la limite dans le champ proche du rejet, les résultats du modèle étaient entachés d'incertitude dans un rayon de 100 mètres autour de l'émissaire. Or lorsque le panache est bloqué en profondeur, il est transporté par des courants faibles et peu diffusifs, qui à l'échelle de quelques heures ne l'entraînent pas à plus de quelques centaines de mètres.

Les mesures du CEA montrent l'étalement du nuage sur 300 ou 400 mètres maximum. Le modèle n'est donc pas très adapté à ce type de problème, la difficulté résidant néanmoins plus dans l'incertitude que l'on a sur la transition entre la remontée du panache et son écoulement horizontal que dans le maillage du modèle en couches. Celui-ci pourrait en effet être réduit.

Plusieurs essais ont été réalisés, en testant les valeurs des coefficients, des courants et de la vitesse de chute (*annexe 4*).

Une comparaison des résultats du modèle et des mesures est présentée *figure C1-2*, en coupes horizontales, et en prenant pour le modèle l'enveloppe des concentrations maximales rencontrées entre le début et la fin de la simulation (4 heures).

**FIGURE C 1-2 : Comparaisons modèle-mesures  
Coupes horizontales**



### IV.2.2 Campagnes C5 : 8 et 10 septembre 1987

La campagne de mesures qui s'est déroulée en Septembre 1987 était la troisième campagne expérimentale de marquage de l'effluent par des traceurs radioactifs.

Deux injections continues d'Or pendant 1,5 heure environ à la sortie de l'usine de traitement ont été effectuées, l'une le 8 et l'autre le 10 septembre. Pour cette dernière, l'effluent n'a subi aucun traitement, la moitié du débit étant by-passé, l'autre moitié traversant les décanteurs sans ajout de floculant.

Ces deux expériences avaient pour objectif de comparer le comportement des particules solides présentes dans l'effluent traité par la station avec celui des particules existant dans un effluent non traité.

Comme pour les campagnes C1 et C2 précédentes, des chapelets de sondes placées à différentes profondeurs étaient trainées par deux bateaux, permettant cette fois d'obtenir des informations aux profondeurs suivantes : -1m, -4m, -7m, -10m, -14m, -18m, -21m, -25m et -30 mètres.

Des mesures de détection ont également été réalisées au point fixe, dans la partie ascendante du panache au moyen de 5 sondes réparties selon la profondeur.

Les résultats de cette campagne ont donné lieu à un rapport du CEA (BRISSET 1986).

Des mesures par prélèvements d'eau ont été réalisées autour du panache à plusieurs profondeurs, en se guidant sur la mesure de radioactivité pour être certain de prélever dans le nuage de pollution.

Seule la campagne du 8 septembre a été exploitée ici, nous en présentons les résultats brièvement ci dessous :

#### CAMPAGNE DU 8 SEPTEMBRE 1987

Pendant tout le mois de Septembre 1987, la girouette de la station météo était défectueuse. Quatre courantomètres étaient mouillés; en surface, à -5 et -15 mètres de profondeur et au fond; celui du fond donnant des résultats aberrants par rapport aux autres.

Le courant portait vers l'Est et Sud-Est, avec des intensités de l'ordre de 7 à 10 cm/s en surface, 4 à 6 cm/s à -5 mètres et autour de 2 cm/s à -15 mètres.

Les chaînes de thermistances mouillées pendant le mois de septembre et les profils de sonde réalisés le jour de la campagne montrent la présence d'une stratification importante (jusqu'à 7°C), positionnée en profondeur; la thermocline étant placée entre 20 et 40 mètres environ sous la surface.

La concentration maximale de traceur radioactif a été observée au niveau -18 mètres, là où la tache est la plus importante. Le transit a eu lieu vers le sud-est, faible à toutes les profondeurs. On n'a pas détecté de traceur au dessus de -10 mètres.

Les deux modèles, "JET" et modèle en couches ont été appliqué en utilisant les données présentées sur la fiche C5 (annexe 5).

## RESULTAT DU PROGRAMME "JET"

Selon que l'on utilise tel ou tel profil de densités mesurés pendant la période, on obtient des résultats un peu différents; mais en général, avec un débit du rejet égal à  $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$  et une densité de l'effluent égale à 0,9971, on obtient les résultats suivants :

cote de blocage : 20-22 mètres  
hauteur du dôme : 5,5-9 mètres  
épaisseur du nuage initial : 1,5-2 mètres  
vitesse horizontale : 0,11-0,15 cm/s  
diamètre du panache avant étalement : 5,5-6,5 mètres  
diamètre du panache après étalement : 30-35 mètres  
dilution à 84% : 14-15

On retrouve donc bien avec le modèle "JET" la capture de l'effluent vers 20 mètres de profondeur. L'imprécision de 2 mètres sur la côte de blocage provient du calcul proprement dit, et bien sur des incertitudes sur les données d'entrée (débit variable non régulé, densités du milieu) et sur la mesure (profondeur des sondes etc..)

Par ailleurs, les mesures de dilution sur une verticale en un point fixe au dessus de l'émissaire montre bien la variabilité de la réponse et la structure très turbulente du panache. (BRISSET 1987)

## APPLICATION DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE HORIZONTAL

Rappelons que l'application du modèle de transport et mélange au cas d'un panache capté en profondeur est soumise à un certain nombre d'incertitudes:

- la transition entre le panache de remontée et l'écoulement horizontal n'est pas traitée. Les mouvements turbulents et la courantologie locale induite par le panache n'est pas prise en compte. la répartition des flux sur la verticale est inconnue, et prise constante en moyenne.
- les courants sont faibles à ces profondeurs, leurs directions et leurs intensités, proches du seuil de démarrage des courantomètres, sont mal connus;
- le nuage se développe dans sa tridimensionnalité, ce qui rend plus complexe son traitement. Son développement vertical dépend de la diffusion verticale et de la vitesse de chute, paramètres imprécis dans l'état actuel de nos connaissances.

Les résultats seront donc examinés avec prudence, et la comparaison des dilutions calculées et mesurées est brièvement présentée.

Le rejet d'Au<sup>198</sup> dure une heure et demi. Le modèle démarre avec des conditions initiales nulles. Le modèle utilise les données de la fiche C5, avec des courants dans chaque couche choisie à partir des mesures, mais aussi à partir des résultats du CEA, notamment en directon.

La comparaison avec les mesures est présentée en terme de profils longitudinaux de concentrations (*figure C5-1* : 1 heure, 3 heures, 4 et 5 heures après le début de l'injection), et par coupes horizontales (couches 3, 4 et 5) (*figure C5-2*), montrant l'enveloppe des concentrations maximales rencontrées au cours du temps.

FIGURE C5-1

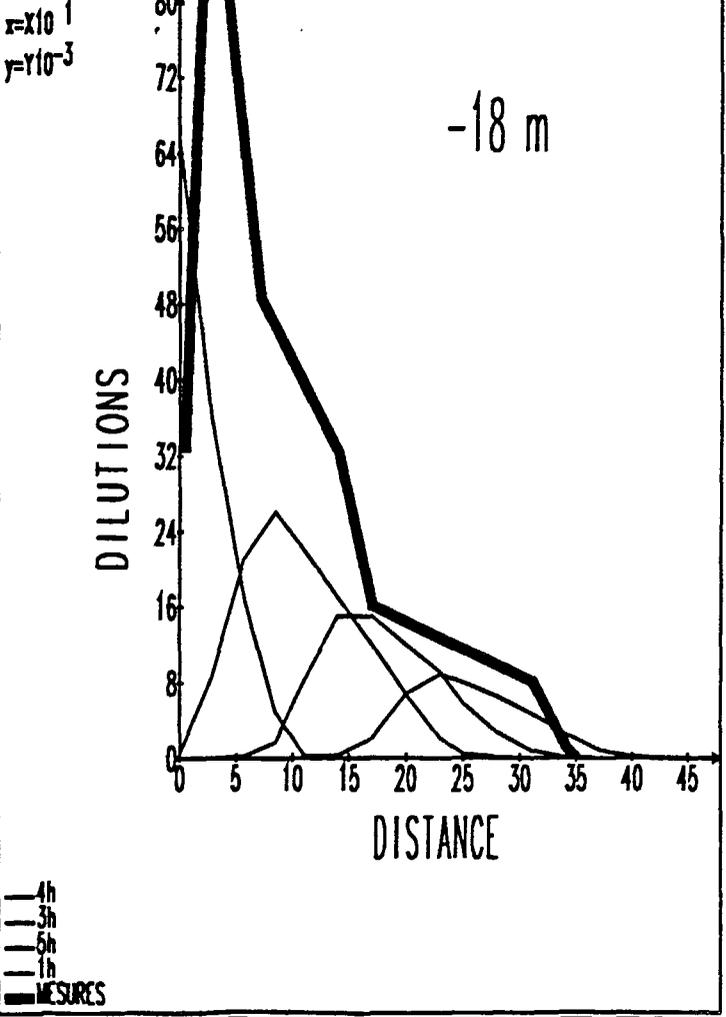
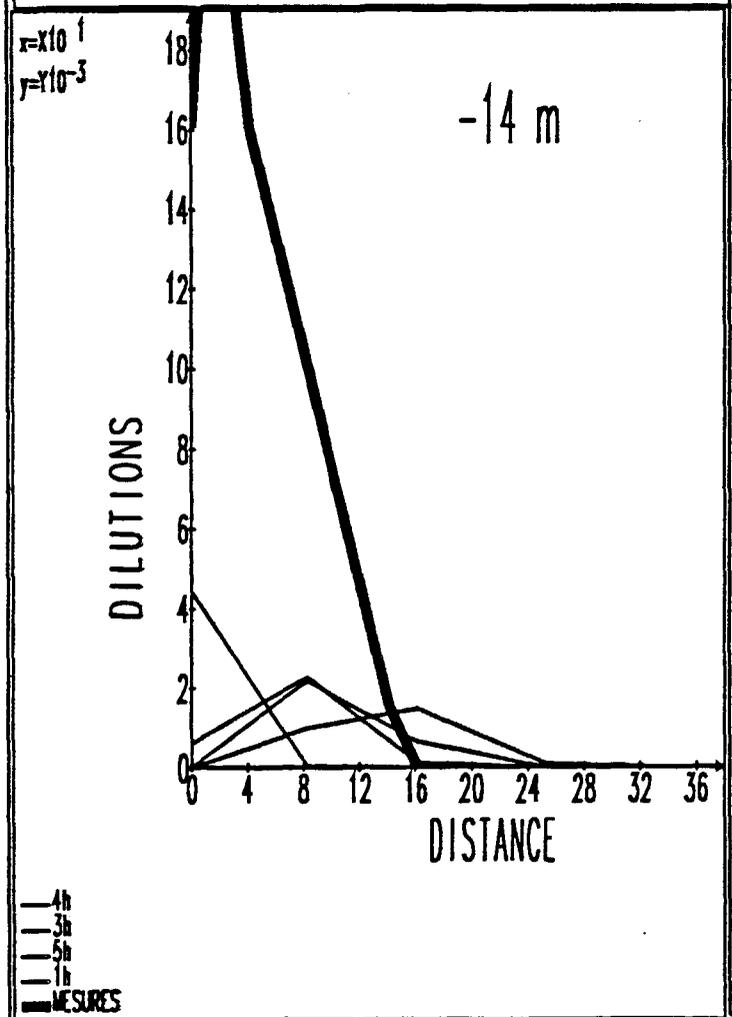
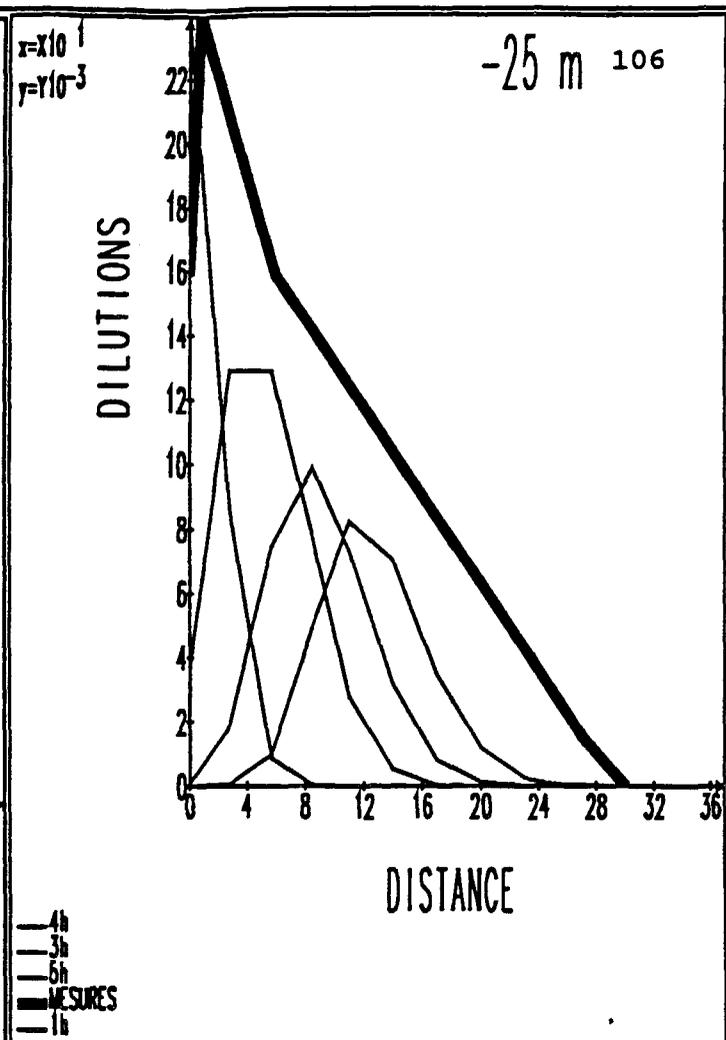
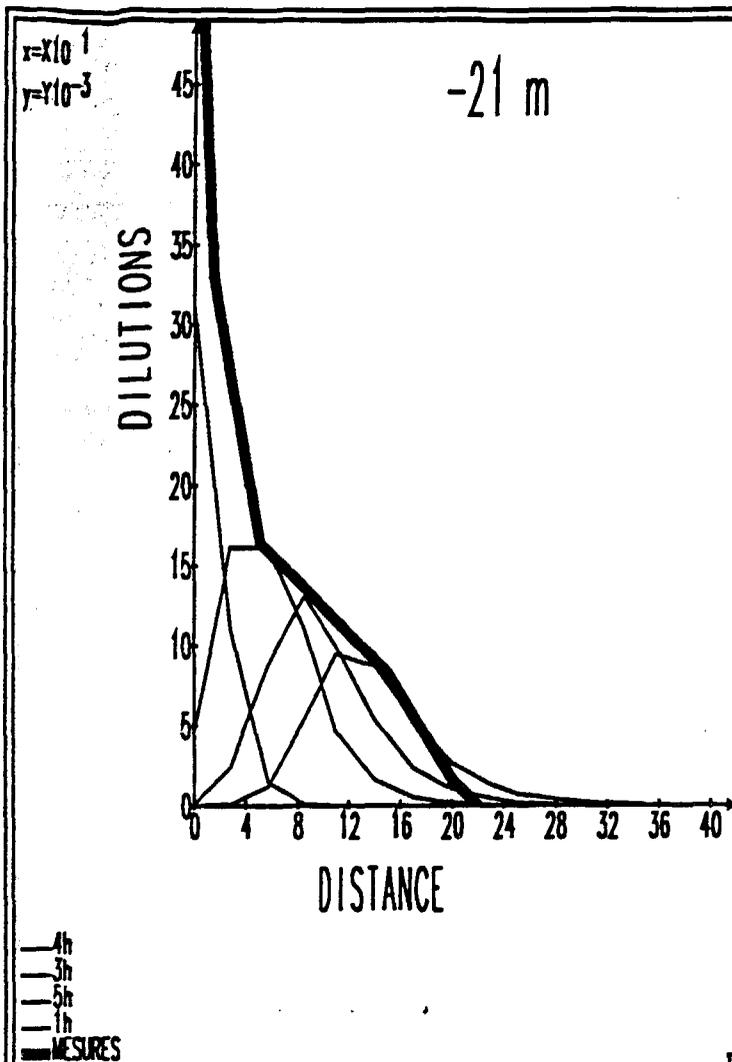
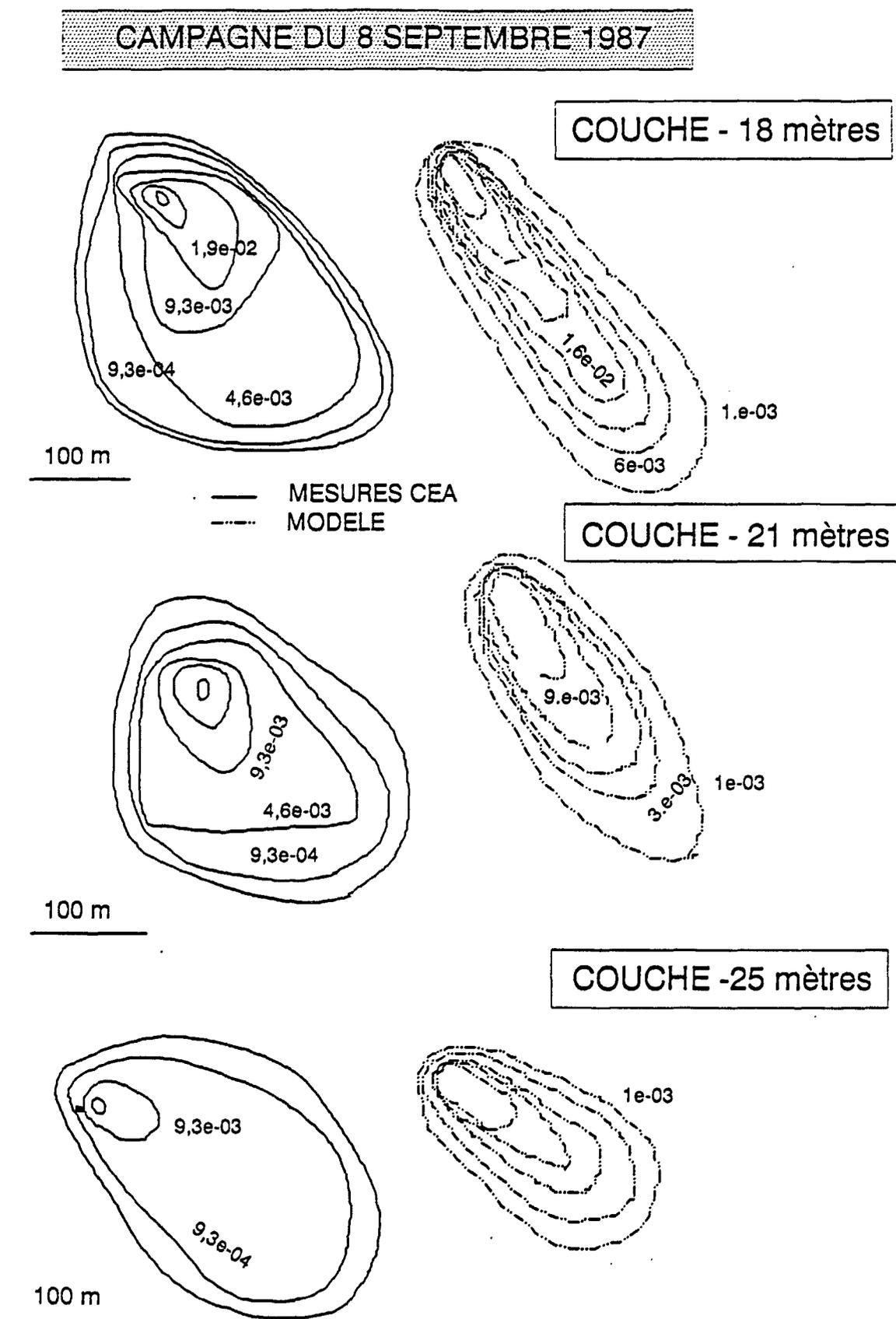


FIGURE C5-2 Comparaison modèle-mesures Coupes horizontales



Dans cet exemple, la répartition initiale des flux est la suivante :

couche 3 (-27 à -23m) : 14% = 3,5% par mètre  
 couche 4 (-23 à -20m) : 14% = 4,7% par mètre  
 couche 5 (-20 à -16m) : 70% = 17,5% par mètre  
 couche 6 (-16 à -12m) : 2% = 0,5% par mètre

Au bout de 5 heures la répartition du stock dans la zone devient :

couche 2 (-31 à -27m) : 1,4% = 0,35% par mètre  
 couche 3 (-27 à -23m) : 16% = 3,9% par mètre  
 couche 4 (-23 à -20m) : 18,4% = 6,1% par mètre  
 couche 5 (-20 à -16m) : 60% = 14,9% par mètre  
 couche 6 (-16 à -12m) : 4,4% = 1,1% par mètre

Le nuage s'est légèrement diffusé dans les couches supérieures et inférieures, mais globalement il reste cantonné dans les mêmes profondeurs qu'au départ du rejet.

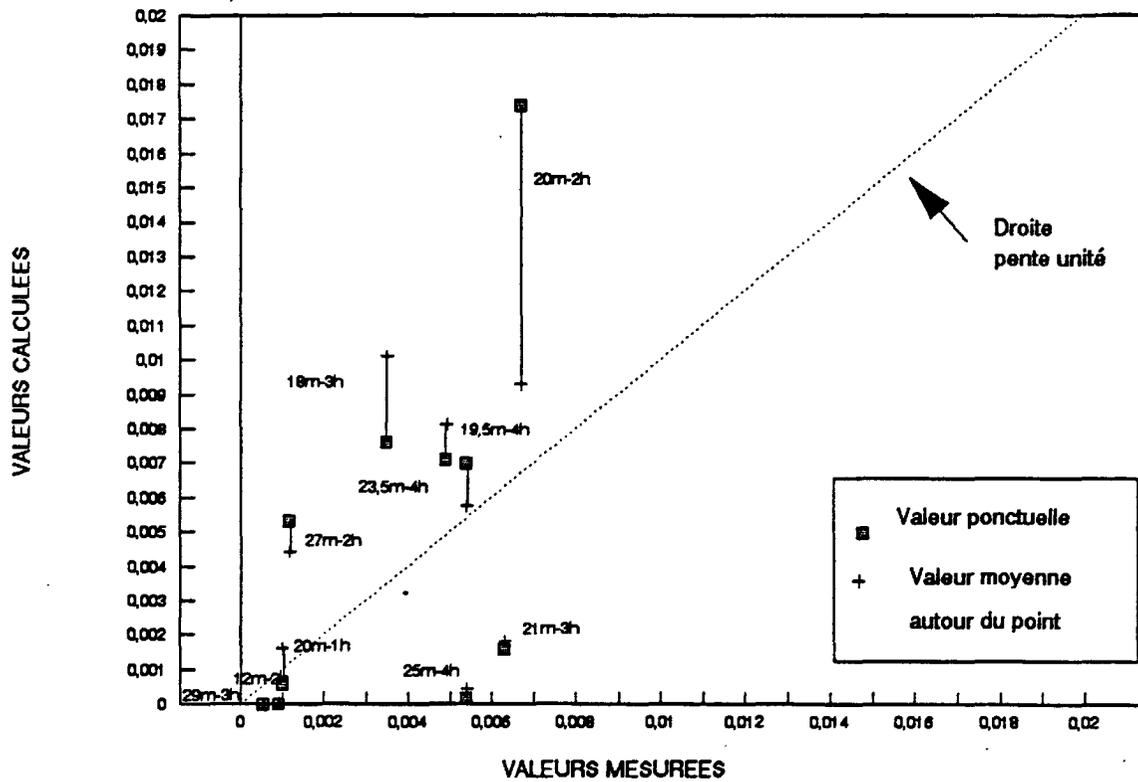
Les prélèvements d'eau, qui ont donné lieu à des analyses de paramètres conservatifs, tels que l'ammonium, sont utilisés ici pour comparer les dilutions calculées et mesurées. La *figure C5-3* trace les valeurs calculées par le modèle en fonction de la valeur mesurée au point correspondant. Deux valeurs sont reliées par une ligne, la valeur ponctuelle du modèle et une valeur moyenne autour du point.

On constate que le modèle donne en général des valeurs trop fortes, ou beaucoup trop faibles, et que la corrélation n'est pas bonne, moins satisfaisante que dans les campagnes qui se déroulent en surface.

La variabilité du milieu dans le temps et dans l'espace est en effet difficilement comparable à des calculs moyens, provenant de la dilution d'une source constante se diluant dans un milieu uniforme et stationnaire.

Ces résultats montrent qu'il est inutile de comparer les concentrations des paramètres non conservatifs avec les résultats du modèle. Il serait en effet impossible de faire la part entre le phénomène de transformation lui-même et l'incertitude des résultats.

FIGURE C5-3

**CAMPAGNE C5 DU 8 SEPTEMBRE 1987**  
**MESURES DE DILUTION NH4**

## CONCLUSION DE L'APPLICATION DES MODELES AUX CAMPAGNES DE MESURES EN MER

L'application des deux modèles aux campagnes de mesures sur le terrain a permis de vérifier les résultats des simulations, de tester la sensibilité aux coefficients utilisés et de dégager les limites d'application des modèles.

La réalisation proprement dite des campagnes de mesures a mis en évidence le grand nombre de difficultés techniques auxquelles on est confronté lorsque l'on veut suivre un effluent en mer. Pour détecter la présence de l'effluent et suivre son transport au cours du temps, il est nécessaire de trouver un marqueur spécifique, en injectant à la station d'épuration un produit coloré (Rhodamine) ou radioactif qui est facilement mesurable même à des faibles concentrations. En effet, les paramètres de l'effluent (matières en suspension, polluants ou sels nutritifs) sont le plus souvent trop proches du bruit de fond ou très chers à analyser. Surtout ils ne sont pas identifiables instantanément sur le terrain et ne peuvent servir à repérer le nuage et à guider les prélèvements.

Ces campagnes de mesures sont donc, de part l'organisation et les moyens qu'elles mettent en oeuvre, obligatoirement ponctuelles et limitées dans le temps. Malgré l'intérêt et l'importance des résultats qu'elles donnent, elles ne rendent compte que de certaines situations particulières et difficilement prévisibles à l'avance. Elles sont tributaires des conditions météorologiques de la journée concernée. Par ailleurs, les conditions extrêmes correspondant à des tempêtes ne peuvent être suivies par ce type de méthode.

Les problèmes techniques inhérents à tout type de mesures en mer, notamment par mauvais temps, sont aggravés ici par la durée limitée des campagnes. Celles-ci doivent remplir leurs objectifs pendant les quelques heures après l'arrivée de l'effluent marqué en mer et avant qu'il ne soit transporté trop loin et mélangé trop intensément.

Ces problèmes techniques peuvent introduire de grandes incertitudes sur les données à injecter dans les modèles pour simuler la situation observée pendant la campagne (par exemple les défaillances d'un ou plusieurs courantomètres pendant le suivi de l'effluent).

La comparaison des résultats des modèles avec les mesures a montré l'importance de la prise en compte de l'évolution du milieu pendant la campagne. Il est extrêmement rare d'obtenir un "état stationnaire" pendant plusieurs heures. Les courants évoluent constamment et le transport de l'effluent en est affecté. Une situation moyenne calculée par le modèle ne peut être comparée à des mesures instantanées. Inversement une image globale de l'effluent résultant d'un ensemble d'observations étalées dans le temps ne représente pas un "état stationnaire" mais la somme de toutes les positions prises par l'effluent pendant la campagne.

D'autre part, on observe, surtout dans la zone proche de l'émissaire, une très grande hétérogénéité des concentrations. Le modèle ne calcule qu'une valeur moyenne dans une maille dont les dimensions peuvent dépendre de chaque application. Dans notre cas, la maille horizontale est un carré de côté égal à 20 mètres; cela veut dire que le modèle ne peut reproduire des phénomènes dont l'échelle spatiale est inférieure à 20 mètres. Dans la zone proche de l'émissaire, lorsque le panache arrive en surface, il devient un "nuage" parfois bouillonnant, qui peut s'étaler en forme d'anneau et dont l'échelle spatiale au départ est de l'ordre de la maille du modèle de transport et mélange (20 à 50 mètres). Il est donc illusoire de vouloir comparer les mesures ponctuelles dans le nuage proche de l'émissaire à une ou deux valeurs du modèle qui est sensée représenter cette zone.

L'étude de sensibilité du modèle de transport et la comparaison des résultats avec les campagnes montrent que, au delà de 100 à 200 mètres autour du rejet, le modèle donne de bons résultats. Ils ne sont pas très sensibles à la condition à la limite caractérisant le panache et à sa répartition spatiale dans le "champ proche". Seul le flux rejeté et l'épaisseur du nuage sont importants.

La comparaison du modèle "JET" et des mesures sont satisfaisantes. On a montré également que la répartition sur la verticale du flux injecté serait uniforme sur l'épaisseur du nuage, donné par le modèle "JET".

Lorsque le milieu est stratifié et que le panache est bloqué en profondeur, les courants sont faibles et la zone d'étalement du nuage est beaucoup moins étendue qu'en surface. Le modèle actuel est mal adapté à ce type de situation, où le nuage est localisé autour de l'émissaire et soumis à de fortes turbulences dues à la remontée du panache.

Le développement du dôme sur la verticale est traité de manière approchée et stationnaire par le modèle "JET". Les mesures montrent de grandes fluctuations entraînant une répartition de l'effluent sur une grande profondeur d'eau. Toutefois, la majorité du rejet est cantonnée sur une couche d'eau d'épaisseur faible, et le modèle "JET" calcule de façon très satisfaisante la profondeur de captage mesurée.

Ces applications ont également permis de trouver des ordres de grandeur satisfaisants pour les coefficients de diffusion horizontale et verticale. Les mêmes valeurs ont été utilisées pour toutes les campagnes du même type. En surface, le coefficient de diffusion horizontale a été pris variable en fonction du courant, d'autant plus fort que le courant est intense. En profondeur par contre, il a toujours été choisi très faible.

Le coefficient de diffusion verticale est plus délicat à caler, étant donné l'incertitude sur les courants horizontaux et surtout sur la vitesse de chute dont l'effet se conjugue à la diffusion pour provoquer le transfert d'une partie de l'effluent d'une couche horizontale à l'autre.

Différentes combinaisons du coefficient  $K_z$  et de la vitesse de chute ont été testées. Il semble qu'une vitesse de chute de l'ordre de 0.3 mm/s et un coefficient maximale  $K_1$  de 0.003 m<sup>2</sup>/s donnent des résultats satisfaisants.

En conclusion les modèles utilisés donnent globalement des résultats intéressants et comparables aux mesures, aux incertitudes sur les données et sur les mesures près. Une réserve est faite toutefois en milieu stratifié lorsque le panache est bloqué en profondeur. La transition entre le panache vertical et le nuage horizontal est mal ou pas traité par le modèle "JET". Le modèle de transport et mélange a une définition spatiale trop grande.

Les résultats des modèles sont étroitement reliés à la définition des courants et de la stratification.



**CHAPITRE V**

**APPLICATION DES MODELES  
AU CYCLE ANNUEL DE MESURES**

Les modèles ont donc été confrontés aux mesures et la sensibilité des résultats aux conditions du milieu a été examinée. Les deux modèles vont maintenant être appliqués aux mesures de longue durée afin de visualiser plus précisément le comportement de l'effluent sur un cycle annuel.

Le but poursuivi au départ était de calculer les flux annuels sortant de la zone d'étude sous forme dissoute et particulaire, dans chaque direction et profondeur.

Cet objectif supposait que l'on ait pu dégager des situations types de circulation et de stratification qui puissent correspondre à des réponses constantes du comportement de l'effluent après son émission.

Or les mesures et l'étude de sensibilité des modèles montrent qu'il est quasiment impossible de trouver de tels "cas types", permettant de rendre compte du comportement du panache et du nuage de polluant pendant un cycle annuel.

Les modèles ont donc été simplement appliqués aux mesures, en essayant de dégager des comportements généraux ou caractéristiques, sans chercher à calculer exactement les flux sortant de la zone dans chaque direction.

### V.1. APPLICATION DU MODELE JET AUX MESURES IN SITU

Des mesures de courants et de salinité ont été réalisées en continu pendant les années 1986 et 1987 en 4 points répartis sur la profondeur d'eau (fond, -15m, -5m et surface). Des profils de température ont été également effectués en continu dans la même zone autour du rejet de TOULON EST, à raison d'une mesure tous les deux mètres (THOUVENIN *et al* 1988 ; SOGREA 1989).

La *figure V.1* décrit l'évolution des températures de Mars 1986 à Septembre 1987. On y observe des périodes homogènes en hiver, des périodes de fortes stratifications en été, et des refroidissements brutaux, même en été, dus vraisemblablement à des upwellings dans la rade de Toulon.

Les profils de température, relevés toutes les 15 minutes, ont été analysés en détail par RAMADE (1991). Le but de cette étude était de rechercher des "profils types" de stratification, qui seraient caractérisés par une fréquence d'apparition et une durée pendant laquelle chaque profil type peut se maintenir sans trop de variations.

Cette étude montre qu'il existe un grand nombre de situations types, dont on ne peut réduire le nombre qu'en étendant considérablement les fourchettes de variations des conditions du milieu qui les caractérisent.

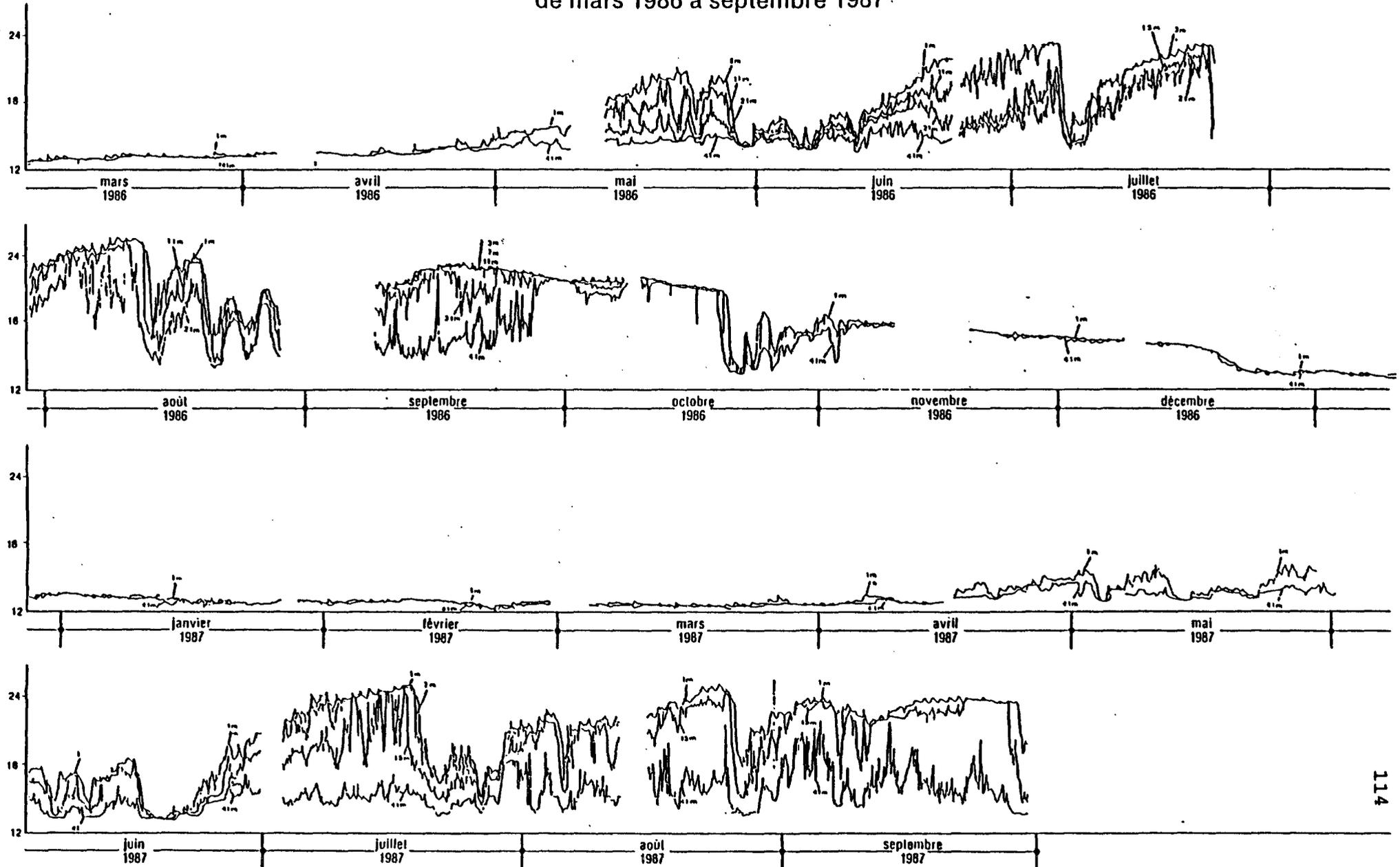
Sur environ 9 mois et demi d'enregistrements, RAMADE trouve 94 cas types répartis selon leur durée. Ils sont caractérisés par leur forme (homotherme, isograde ou clinograde), par la profondeur de la thermocline, la stratification thermique entre les deux limites inférieures et supérieures de la thermocline et l'amplitude thermique entre la surface et le fond.

80% des situations sont représentées par 16 cas types et 90% par 34 cas types. Mais le premier cas type, qui est le profil homogène ( $\Delta T < 1,5^\circ\text{C}$ ), apparaît 54% du temps, le reste des situations types étant beaucoup moins fréquents (<4%, le plus souvent <2%).

FIGURE V.1

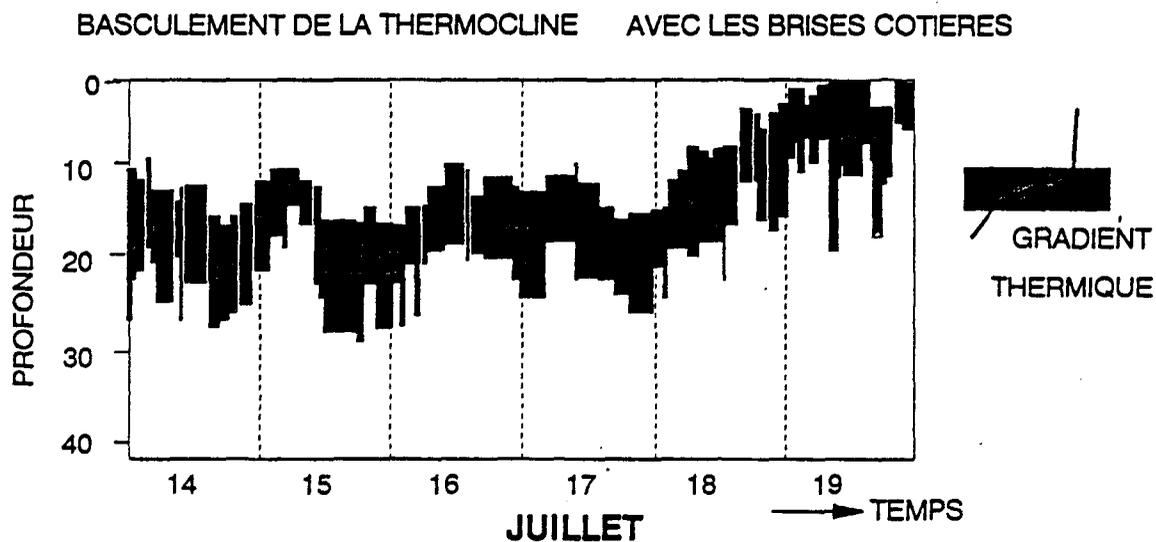
MOUILLAGE AU POINT FIXE DANS LA GRANDE RADE DE TOULON  
TEMPÉRATURE EN FONCTION DU TEMPS.  
de mars 1986 à septembre 1987.

TEMPÉRATURE (°C)

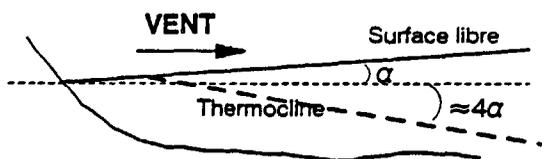


Ces cas types sont parfois caractéristiques d'une période ou bien ils s'enchaînent logiquement pour rendre compte d'un scénario type. Par exemple le basculement de la thermocline en été, qui est associé au régime des brises côtières (figure V.2) donne lieu à une succession répétitive de situations transitoires plutôt qu'à un cas type figé.

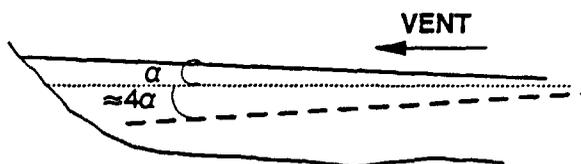
FIGURE V.2 THERMOCLINE EN FONCTION DU TEMPS



VENT DE REFLUX  
EN ETE : la nuit



VENT D'AFFLUX  
L'après-midi



Pour simplifier et pour obtenir une image plus globale de l'évolution de la stratification pendant un cycle annuel, nous avons regroupés les cas types sur la *figure V.3* en n'en retenant que cinq. Leur fréquence d'apparition est représentée en fonction de la période de l'année.

En ce qui concerne les courants, les cas types sont encore plus difficiles à dégager étant données les variations temporelles très importantes de leur direction, notamment avec les brises côtières qui induisent une alternance et une rotation continue des courants au cours de la journée.

De nouveau pour simplifier et pour comparer les courants mesurés aux différentes profondeurs, la *figure V.4* donne les fréquences de rencontre des courants regroupés par classe d'intensité.

RAMADE montre que les cas types stratification-courants sont soit rencontrés un grand nombre de fois mais sur des durées courtes (de l'ordre de l'heure), soit rencontrés plus rarement mais sur des durées plus longues.

Le très grand nombre de cas types qui ont été dégagés et analysés par RAMADE montre que l'évolution du milieu, tant du point de vue thermodynamique que courantologique, est caractérisée par une suite de situations transitoires, souvent reliées à un événement météorologique, mais dont l'interprétation avec un seul point de mesures est difficile.

Le programme JET a été appliqué aux principaux cas types rencontrés. L'analyse de sensibilité des résultats en fonction de la variation de leur caractéristiques montre que le comportement du panache peut varier à l'intérieur d'un même cas type, et qu'il peut également changer selon le profil de courants.

Il est, dans ce cas, difficile de calculer la fréquence de remontée du panache à telle ou telle profondeur pendant un cycle annuel type.

La *figure V.5* montre un exemple de variation de la profondeur de captage du panache pendant 48 heures, en liaison avec les variations de la position de la thermocline. Celle-ci, assez marquée (plusieurs degrés), est représentée par les isothermes ; elle est placée en profondeur à moins de 15 mètres au dessus du fond (25 à 40 m sous la surface). La profondeur de captage calculée par le programme JET varie entre 2 et 25 mètres en fonction des basculements de la thermocline qui, en s'approfondissant, conduit à un profil peu stratifié et chaud.

FIGURE V.5 : Isothermes sur la profondeur en fonction du temps et évolution de la profondeur de captage (trait plus épais)

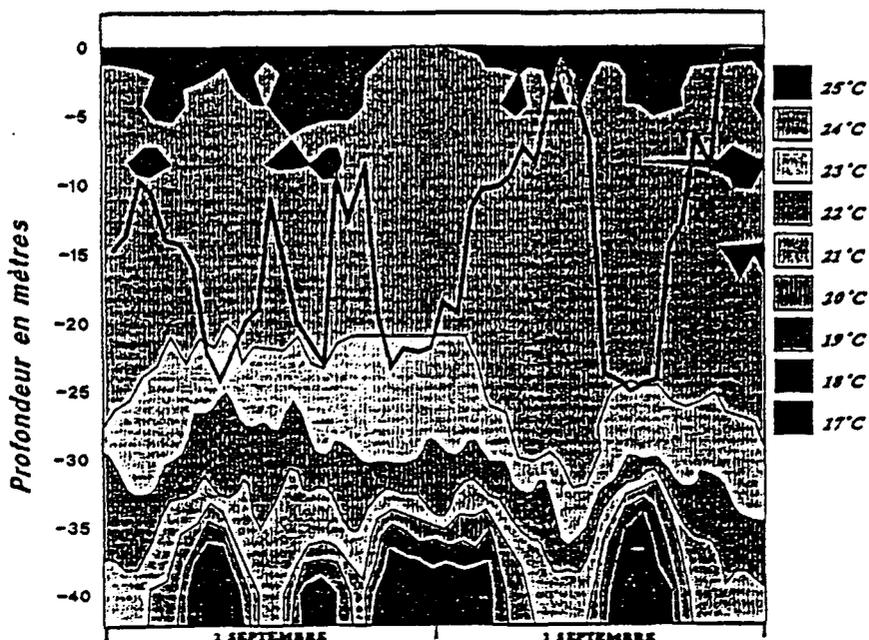


FIGURE V.3 FREQUENCE DES CAS TYPES DE THERMOCLINE

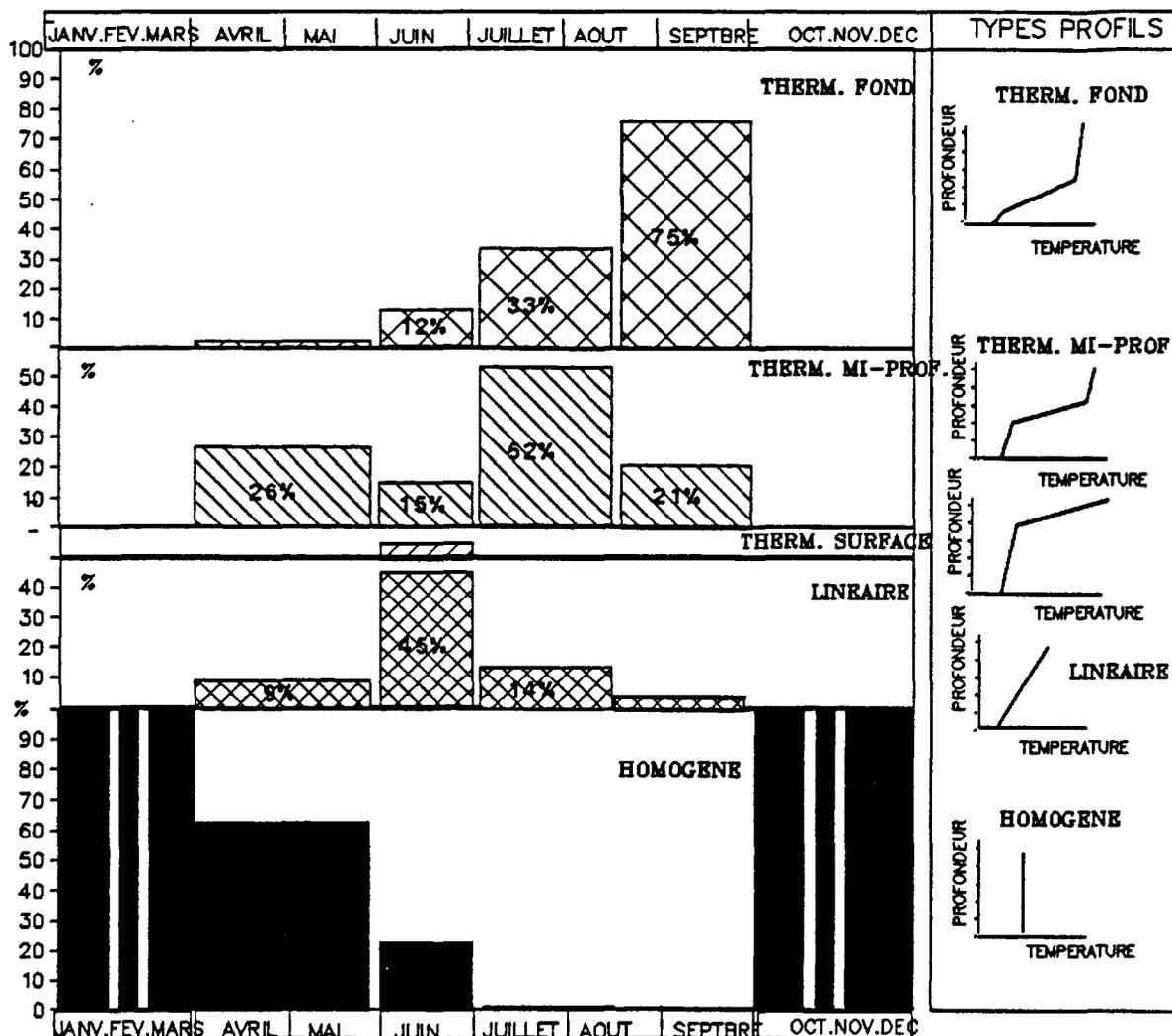
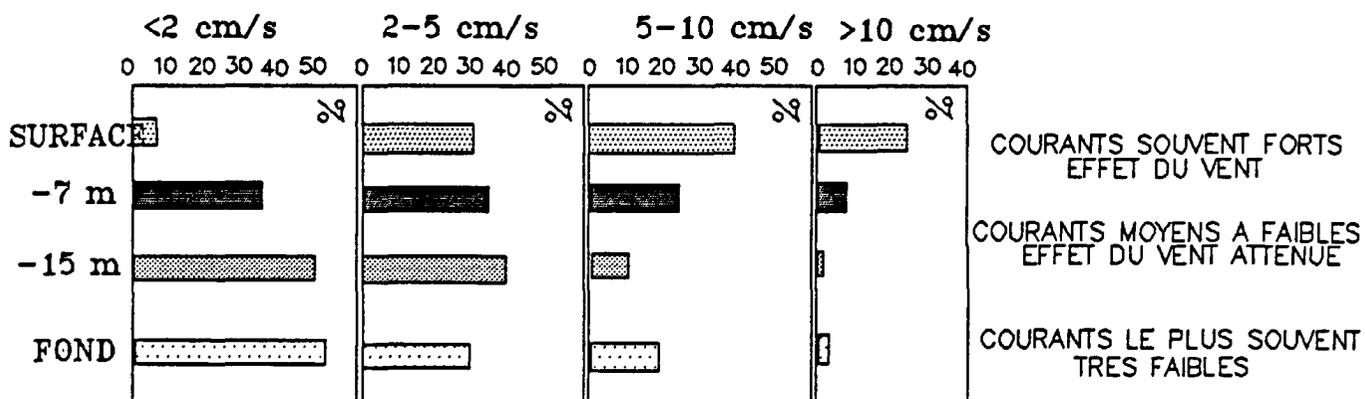


FIGURE V.4 FREQUENCE DES COURANTS



Le modèle JET a alors été directement appliqué en utilisant les mesures de températures, salinité et courants disponibles au cours du temps. On obtient ainsi une fois par heure la position du panache pendant chaque période de mesures. La *figure V.6.* décrit l'évolution de cette profondeur de captage pendant trois périodes, de juin à septembre 1987.

La profondeur de captage varie beaucoup pendant les périodes de printemps, été et automne. Le calcul des fréquences de rencontre aux différentes profondeurs montre un approfondissement du captage à la fin de l'été lorsque la thermocline elle-même est plus profonde. (*figure V.7*)

Le modèle JET, simple d'utilisation et ne demandant pas un temps de calcul important, peut donc être appliqué directement aux mesures, sans passer par la définition de situations types stationnaires. Le panache passe d'une profondeur à l'autre selon le profil de densité et de courant, avec un comportement général spécifique à chacune des saisons, caractérisé par des fréquences de captage à chaque profondeur légèrement différentes.

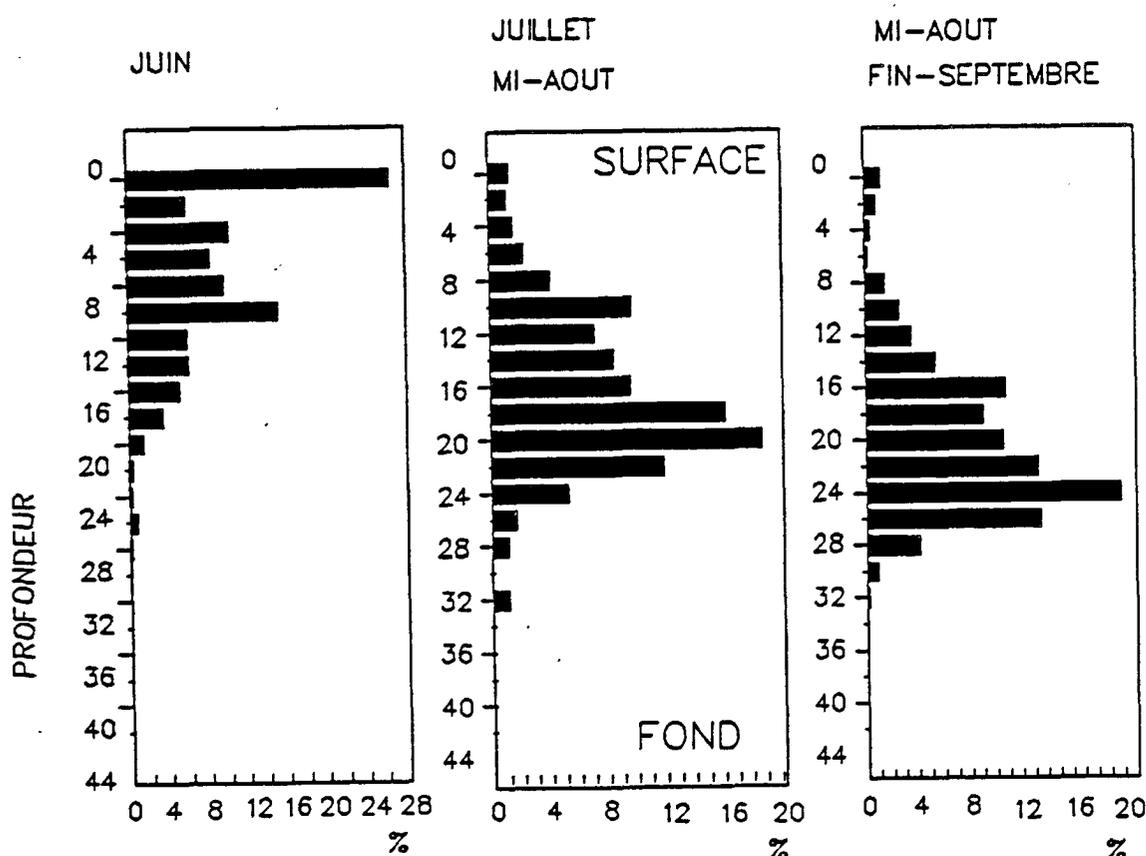
En hiver, d'octobre à mars, le panache arrive systématiquement en surface et s'étale sur une épaisseur moyenne de 5 mètres.

Jusqu'en juin le panache arrive le plus souvent en surface. Il subit pendant un faible pourcentage du temps un captage dans la couche supérieure de la masse d'eau (10 mètres sous la surface).

En été, le pourcentage de captage le plus fort se trouve dans la couche des 20 mètres sous la surface, avec une fréquence d'apparition décroissante de 20 mètres jusqu'en surface.

A la fin de l'été, le panache est pratiquement tout le temps capté en profondeur, entre 8 et 30 mètres, avec un maximum entre 20 et 25 mètres sous la surface.

FIGURE V.7 : Pourcentage de captage pendant l'été 1987



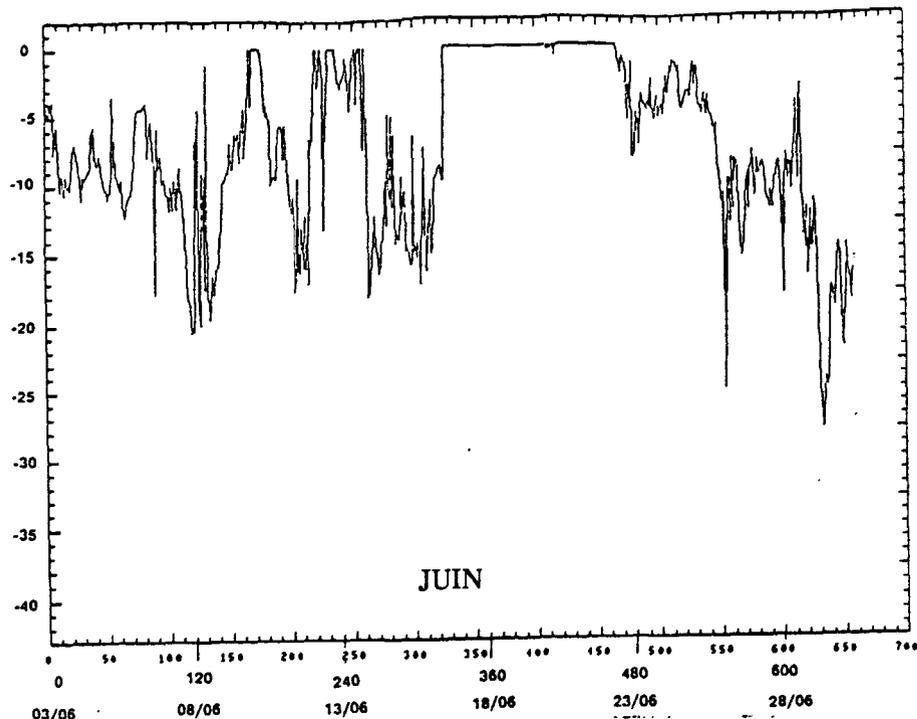
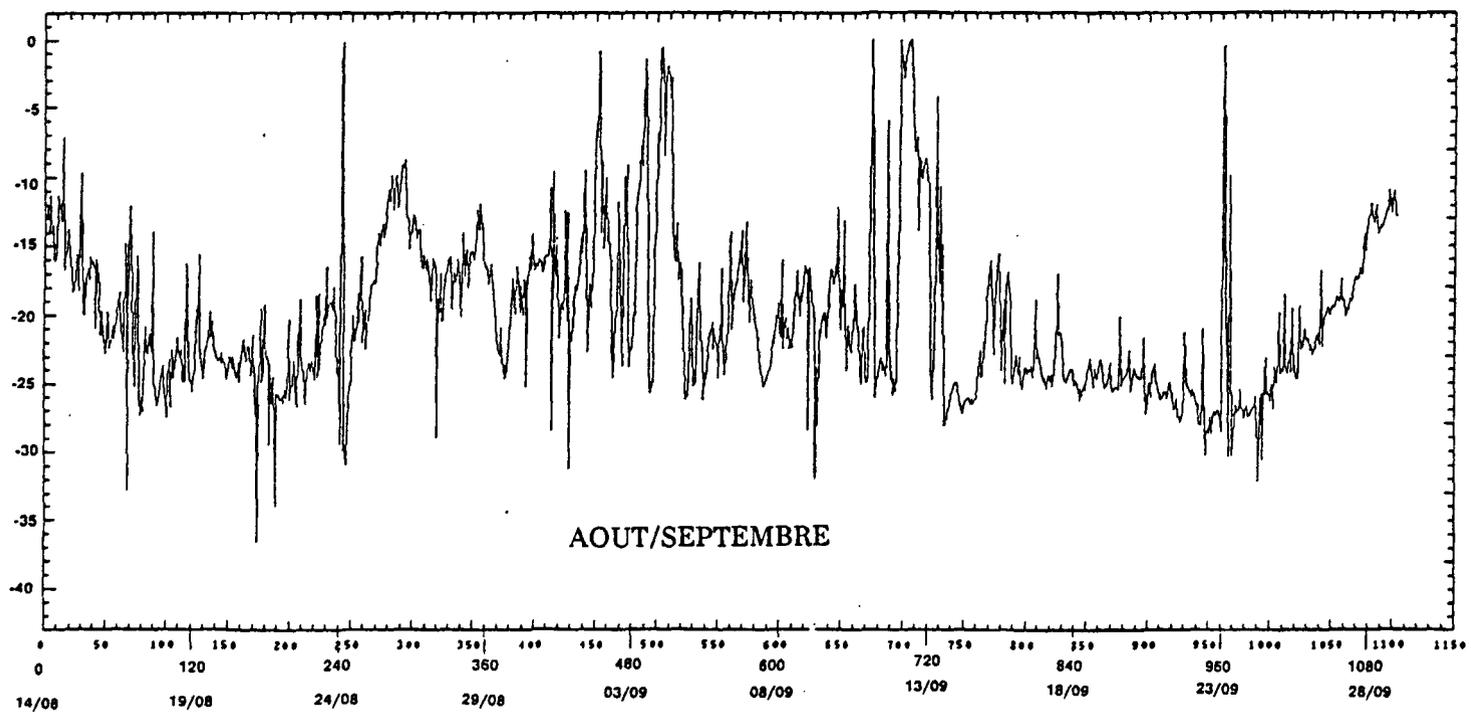
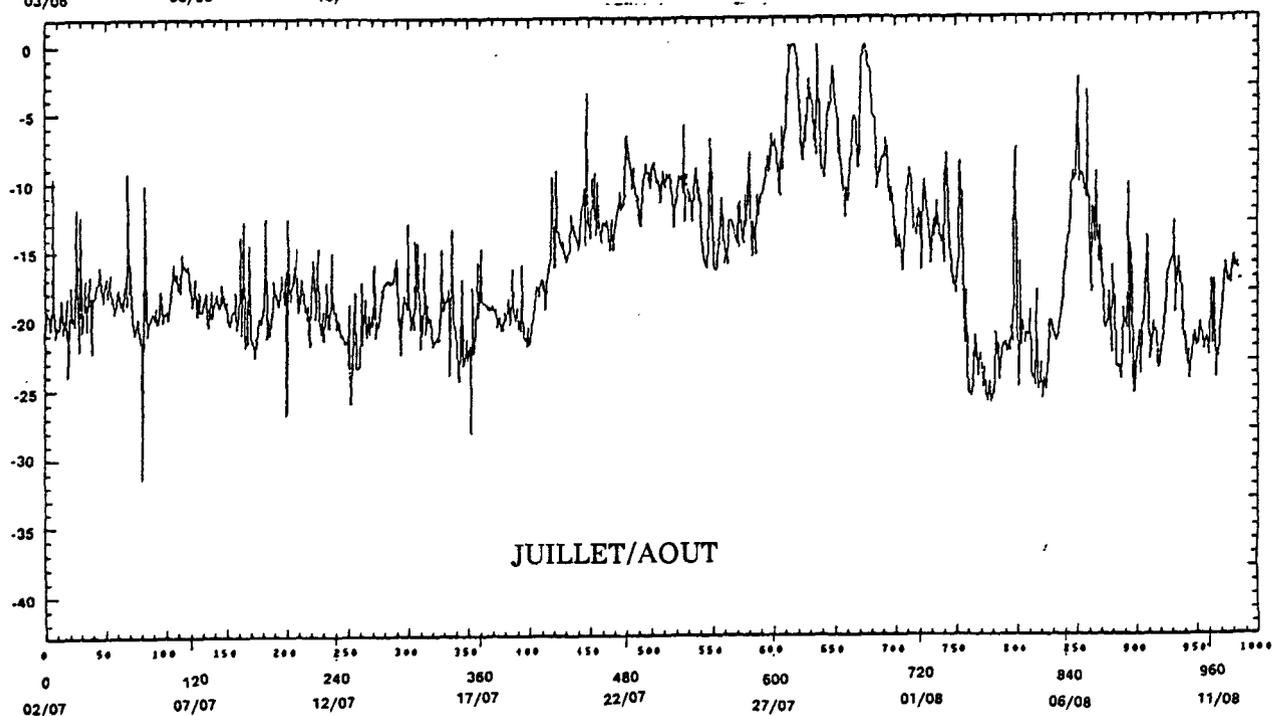


FIGURE V.6  
Evolution de la profondeur de captage en fonction du temps



## V.2. APPLICATION DU MODELE TRANSPORT ET MELANGE A DES SCENARIOS TYPES

En ce qui concerne l'étape de transport et mélange, il est là encore difficile de dégager des situations types, correspondant à des états stationnaires.

L'observation des mesures montre que certains "scénarios" caractéristiques apparaissent; ils seraient liés à des situations météorologiques types mais dépendraient fortement des conditions antérieures. Par exemple, un mistral s'établissant après une longue période de brises sans vent dominant ne provoque pas la même courantologie qu'un mistral s'établissant après une période de vent d'Est fort. Ceci est vrai tout au moins pendant le laps de temps nécessaire pour que la réponse du système soit caractéristique de la nouvelle situation météorologique. Cet état transitoire, dépendant des "conditions initiales", n'est pas très court comparé à l'échelle de temps des variations du vent et on ne peut donc considérer ici des situations stationnaires entrecoupées de petites étapes transitoires. Celles ci sont peut être aussi longues que la situation établie.

On est donc en présence d'un continuum de situations transitoires qui ne permettent pas d'appliquer le modèle à quelques scénarios types et d'en extrapoler les résultats pour une longue période de temps. Néanmoins, à titre d'exemple seulement, le modèle a été appliqué à trois séquences de mesures, sans chercher à caractériser un état stationnaire mais plutôt à dégager un comportement global répondant à une série d'états transitoires "classiques".

Le modèle démarre avec des conditions initiales nulles, c'est à dire sans tenir compte de l'état antérieur à la période analysée. Il tourne ensuite pendant quelques jours avec le même type de temps que le scénario étudié, afin d'obtenir un nuage formé autour de l'émissaire, indépendant des conditions initiales, mais dépendant de ce type de temps.

Les deux premiers scénarios correspondent à des périodes en milieu homogène, l'un animé d'un courant variable et tournant, l'autre animé d'un courant presque unidirectionnel, fort puis s'atténuant, caractéristique d'une situation de mistral.

Le troisième scénario a lieu en Juillet ; le milieu est stratifié en densité et le panache est bloqué avant d'arriver à la surface. Les courants à la profondeur de captage sont faibles et tournants.

Le modèle de transport et mélange est appliqué en utilisant les courants et les densités mesurés toutes les 10 mn par les courantomètres en surface, à -7, -15 mètres et au fond.

Les profils de courants et densités sont interpolés linéairement sur la profondeur à partir des mesures.

Les conditions aux limites ouvertes de la zone d'étude sont prises nulles lorsque le courant est dans une direction telle que de l'eau "propre" entre dans le domaine modélisé. On ne prend donc pas en compte le retour du nuage de pollution dans la zone lorsque les courants tournent. La limite de cette zone est placée à 1 km autour du rejet, sauf pour le scénario de mistral (2km), où l'émergence du rejet est décentré vers l'amont du courant.

La condition limite au rejet est prise constante, avec un débit de  $0,20 \text{ m}^3 / \text{s}$ .

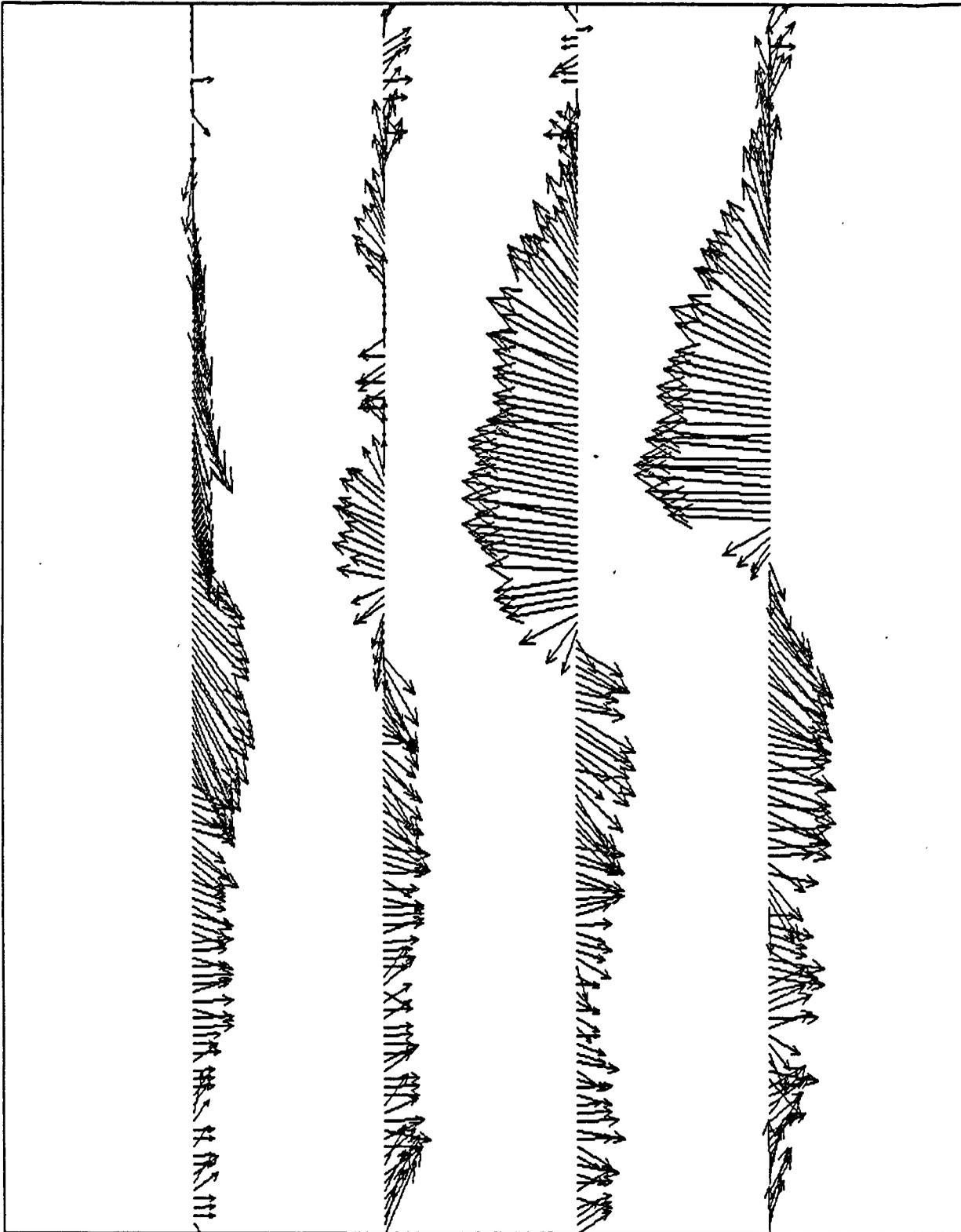
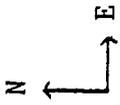
Les résultats sont présentés pour deux paramètres: les détergents et les coliformes fécaux. Pour ces derniers, la loi de disparition en fonction de la lumière a été introduite.

La concentration en coliformes fécaux dans l'effluent est prise égale à  $10^7$  ou  $10^6$  selon les cas (été ou hiver).

Le flux de détergents, sortant de l'émissaire sous forme dissoute, est pris égal à 90 kg/jour (ROMANA *et al* 1991).

FIGURE V.8

Vecteur courant aux quatre profondeurs de mesure pendant la journée du 15 Mars 1987 (Scénario 1)



0.155e+02  
MAXIMUM VECTOR

Fond

- 15 m

- 7 m

S

Pour les deux premiers scénarios en milieu homogène, le panache est réparti sur 4 mètres d'épaisseur en surface. Le modèle a été appliqué sur huit couches ; trois couches de surface d'épaisseur 2 mètres, deux couches entre 6 et 14 mètres sous la surface d'épaisseur 4 mètres, les trois dernières couches du fond d'épaisseur respectives 6, 10 et 15 mètres.

Pour le scénario stratifié, deux couches extrêmes de 10 mètres au fond et en surface entourent 6 couches de 4 mètres d'épaisseur.

Le coefficient de dispersion horizontale est pris proportionnel à l'intensité du courant :

$$KH = 0,1 V \text{ avec } V \text{ en cm/s}$$

Le coefficient de diffusion verticale est calculé en fonction du nombre de Richardson en utilisant les coefficients suivants :

$$K_0 = 0,001 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} \quad K_1 = 0,003 \text{ m}^2/\text{s}$$

$K_z$  est maximal à travers les frontières situées à -2 mètres, -4 mètres et au delà de 15 mètres de profondeur. Il est plus faible à -6 et - 10 mètres.

#### A. SCENARIO 1 EN MILIEU HOMOGENE - NUAGE EN SURFACE -

La journée du 15 mars 1987 présente une alternance des courants entre le matin (courants dirigés vers le Sud- brise de terre) et l'après-midi (courants dirigés vers le NORD- brise de mer) (*figure V.8*). Le profil de densité est relativement homogène, l'écart de densité entre le fond et la surface étant inférieur à 0,3.

Les résultats sont présentés en coupes horizontales à 1 mètres de profondeur (*figure V.9*) replacés dans la rade de TOULON, pour les détergents et les coliformes fécaux. Le nuage tourne en suivant l'alternance des courants.

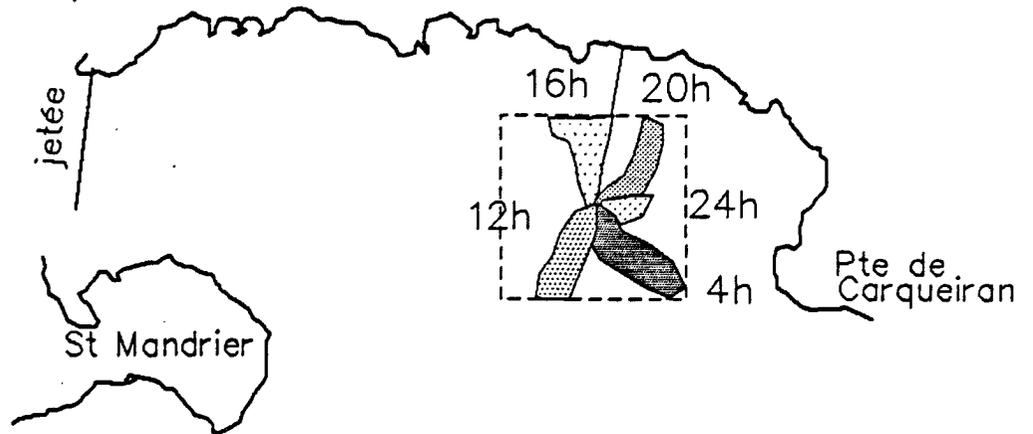
Le stock total de matière provenant de l'effluent et présent dans un rayon de un kilomètre autour du rejet représente 7 à 14 heures de rejet, avec des variations suivant l'intensité du courant qui chasse le nuage hors de la zone à certaines heures du jour et l'accumule à d'autres instants de la journée (*figure V.10*).

Pour les coliformes fécaux, l'introduction d'une mortalité liée à l'intensité lumineuse entraîne des différences importantes entre la nuit et le jour.

FIGURE V.9 SCENARIO 1 – NUAGE EN SURFACE  
 Courant variable et tournant de 4 à 13 cm/s

**DETERGENTS**

limite bruit de fond 5µg/l  
 Flux 90 kg/jour



**COLIFORMES FECAUX**

limite Norme 2000 CF/100 ml

- Conc. effluent =  $10^7$
- ▨ Conc. effluent =  $10^6$

Intensité Lumineuse à 12 h  
 = 2500 E/m<sup>2</sup>/s  
 =>  $T_{90} = 1,2h$

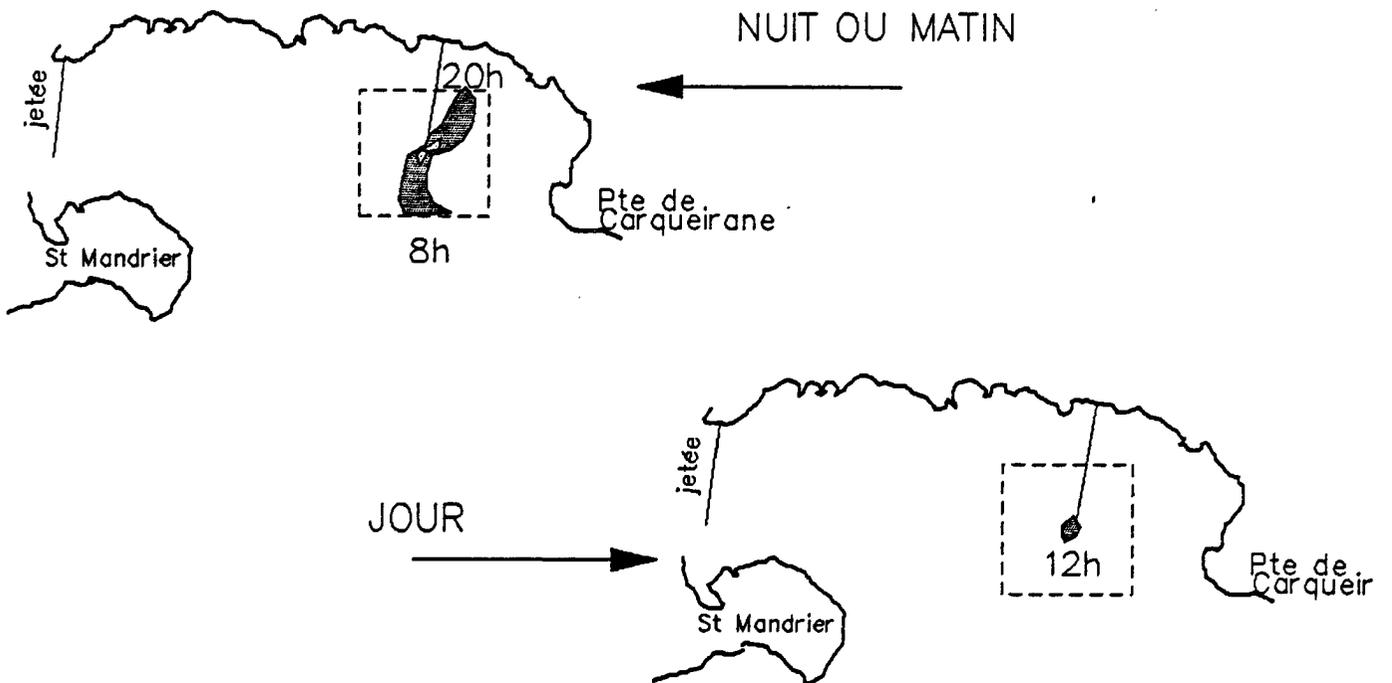
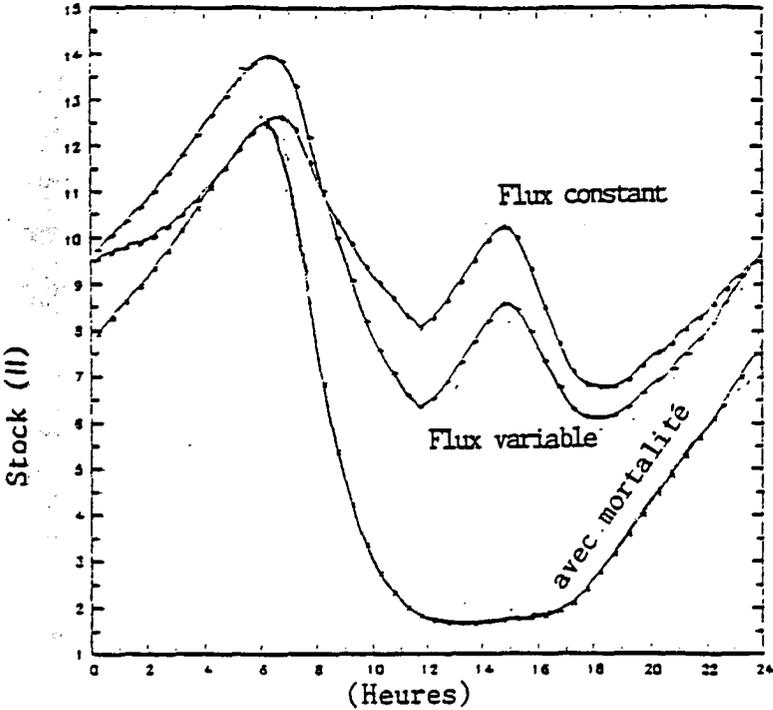


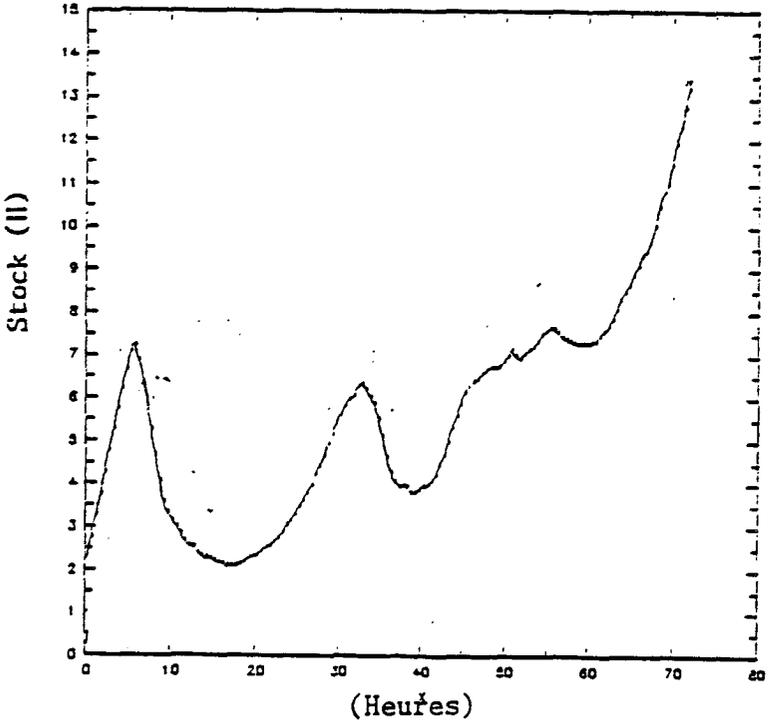
FIGURE V.10

VARIATION DU STOCK EN EQUIVALENT  
HEURE DE REJET

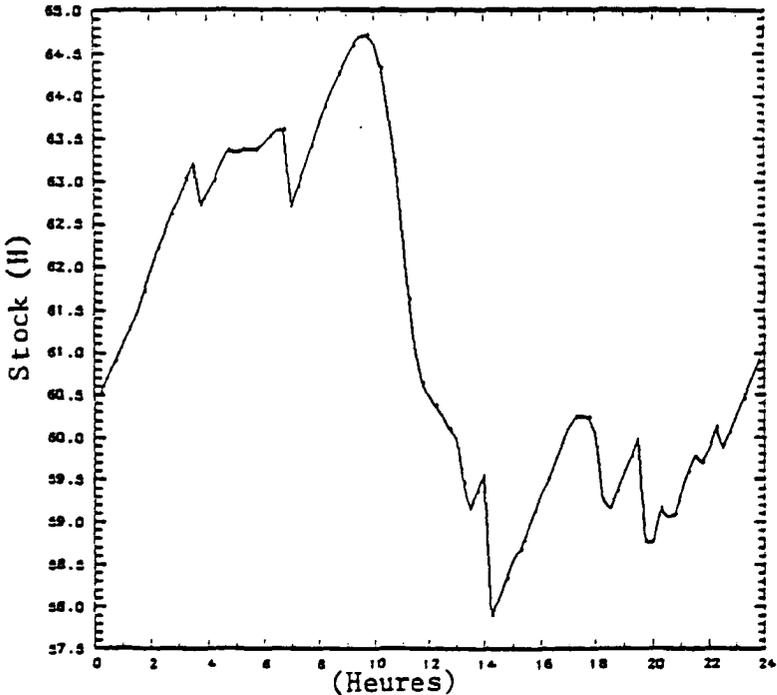
SCENARIO 1 MILIEU HOMOGENE  
COURANT TOURNANT



SCENARIO 2 - MILIEU HOMOGENE  
COURANT UNIDIRECTIONNEL  
FORT PUIS S'ATTENUANT  
PENDANT 3 JOURS  
(SITUATION DE MISTRAL)



SCENARIO 3 - MILIEU STRATIFIE  
COURANT FAIBLE TOURNANT



## B. SCENARIO 2 EN MILIEU HOMOGENE - NUAGE EN SURFACE -

Trois jours sont reproduits dans ce deuxième scénario, correspondant à une situation de mistral. L'intensité du courant est représentée sur la *figure V.11*. Le courant fort le premier jour atteint 28 cm/s, il décroît ensuite pour n'être plus égal qu'à 8 cm/s le troisième jour. Sa direction varie peu autour de 100°.

Les résultats sont présentés sur la *figure V.12*, pour les détergents et les coliformes fécaux.

Pendant le premier jour, les courants étant forts, la dilution est importante et le nuage est moins étendu que les jours suivants. Ceci vient du fait également que l'on commence avec des conditions initiales nulles ou correspondant au même type de temps. Les résultats seraient différents si l'on tenait compte du passé, par exemple si le premier jour de mistral arrivait après une situation de temps calme avec des courants faibles. Le mistral transporterait et mélangerait un nuage plus concentré, tout au moins pendant les premières heures.

Pour les coliformes fécaux, le nuage est beaucoup plus étendu pendant la nuit, ou au matin que pendant la journée. Ceci est dû à la disparition des bactéries avec la lumière incidente du jour. On a porté sur la *figure V.13* la limite du nuage, donnée par la norme 2000 CF/100ml, en fonction du temps (de 0 à 24 heures) et pour les deux premiers scénarios.

Si le nuage peut atteindre des distances supérieures à 2 kilomètres pendant la nuit, il ne dépasse pas 500 mètres en milieu de journée. Ces fortes variations temporelles sont à noter, lorsqu'il s'agit de respecter une norme de baignade ou de salubrité pour les coquillages.

D'autre part, des différences importantes sont notées pour les deux concentrations choisies dans l'effluent. Pour une concentration en coliformes fécaux dix fois plus forte dans le rejet, la distance atteinte par le nuage est considérablement augmentée. En effet, alors que la remontée du panache vers la surface permet d'obtenir un facteur de dilution de 50 à 100, le transport et le mélange par les courants horizontaux n'induit qu'une faible dilution (1,5 à 3 fois tous les 500 mètres), il faut donc une grande distance pour récupérer un facteur dix de dilution.

Or on rencontre dans l'effluent des concentrations voisines de  $10^6$  pendant l'hiver, et de  $10^7$  pendant l'été, et des variations importantes autour de ces valeurs sont observées.

Le stock d'effluent présent dans la zone pendant ces trois jours (*figure V.10*) augmente au fur et à mesure que le courant diminue. Il ne représente que quelques heures de rejet (<7 heures) le premier jour pour atteindre 14 heures le troisième jour. On retrouve alors les même ordre de grandeur que dans le premier scénario.

FIGURE V.11 : VARIATION DU COURANT EN FONCTION DU TEMPS (SCENARIO 2)

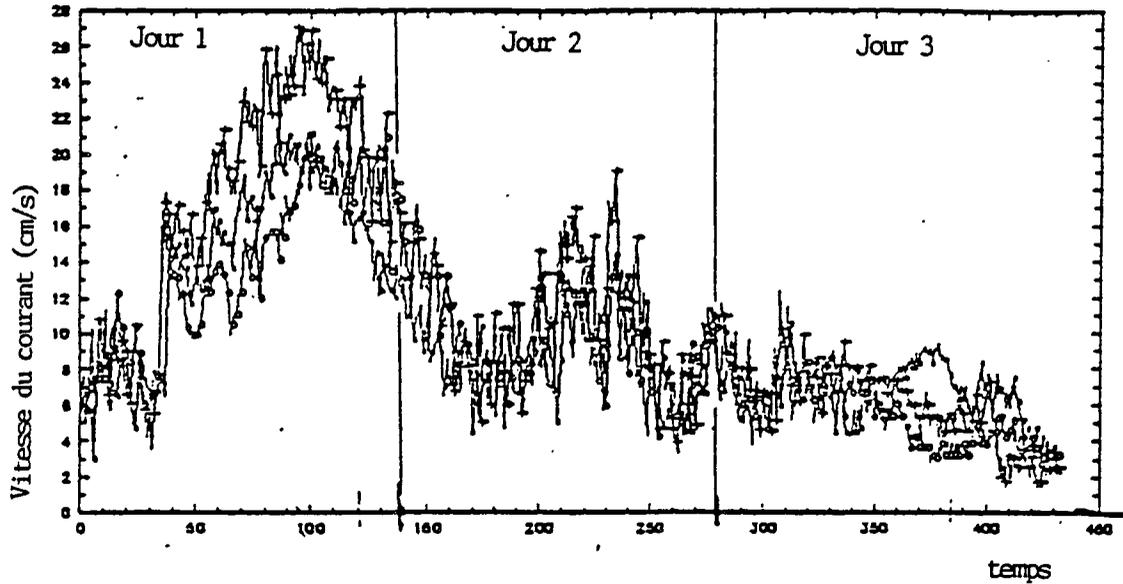


FIGURE V.13 : DISTANCES MAXIMALES ATTEINTES PAR LE NUAGE

La limite étant donnée par la Norme 2000 CF/100ml

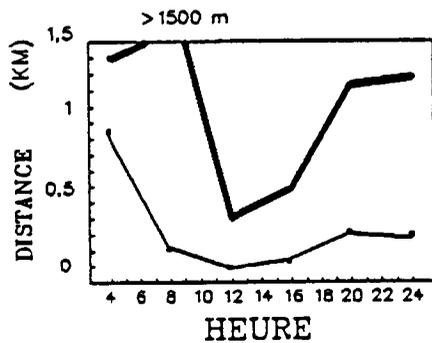
**COLIFORMES FECAUX**

Intensité Lumineuse à 12 h  
= 2500 E/m<sup>2</sup>/s  
=> T<sub>90</sub> = 1,2h

—●— Conc. effluent = 10<sup>7</sup>  
—○— Conc. effluent = 10<sup>6</sup>

SCENARIO 1

COURANT TOURNANT  
PENDANT 24h  
+ à 13 cm/s



SCENARIO 2

MISTRAL  
PENDANT 3 jours  
25, 12, et 6cm/s les 1ier, 2ième et 3ième jour

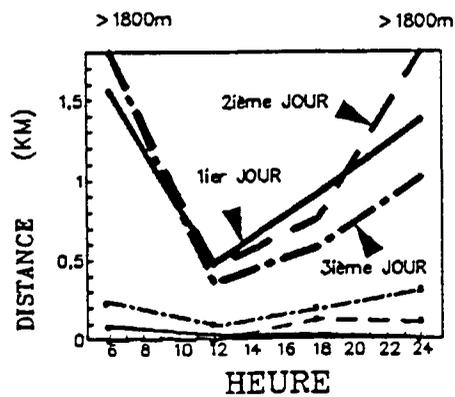
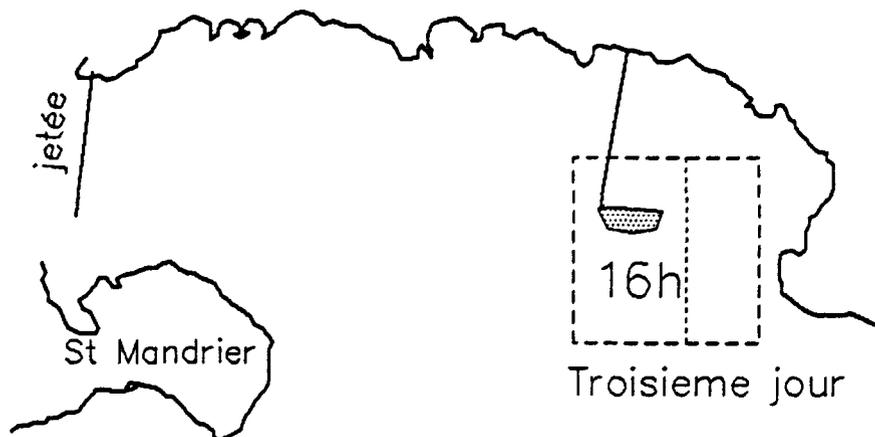


FIGURE V.12 SCENARIO 2 – NUAGE EN SURFACE  
 Mistral pendant 3 jours  
 25, 12, et 6cm/s les 1ier, 2ième et 3ième jour

**DETERGENTS**

limite bruit de fond 5 µg/l  
 Flux 90 kg/jour



**COLIFORMES FECAUX**

limite Norme 2000 CF/100 ml  
 ■ Conc. effluent =  $10^7$

Intensité Lumineuse à 12 h  
 = 2500 E/m<sup>2</sup>/s  
 =>  $T_{90} = 1,2h$

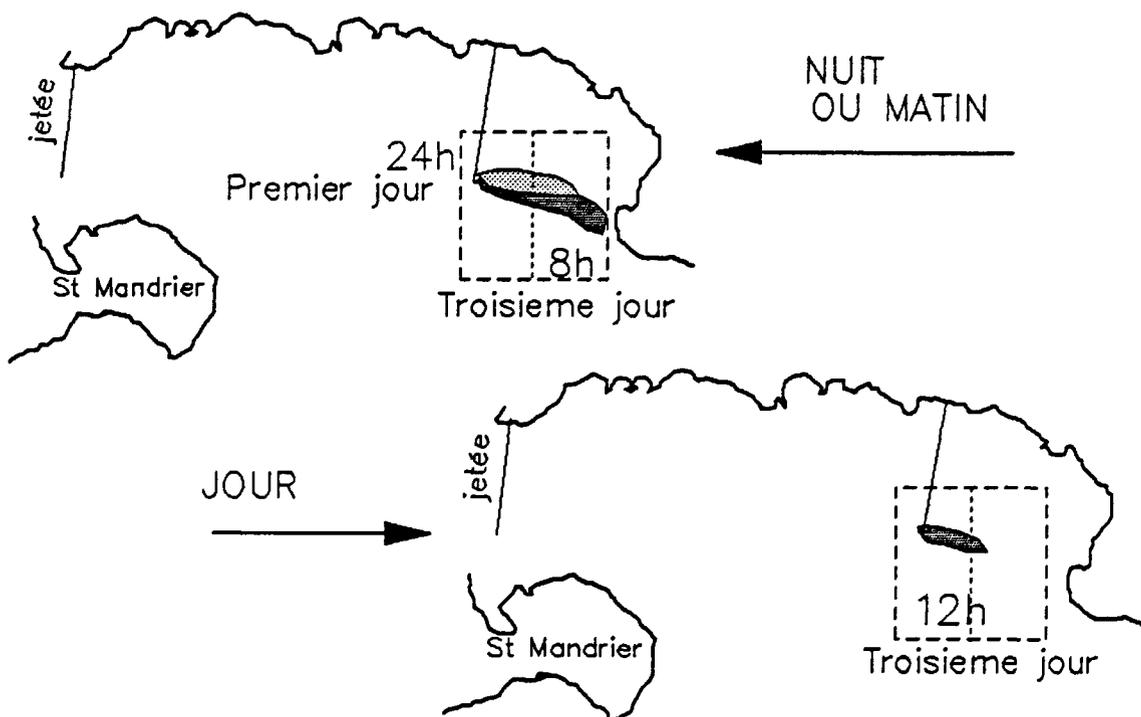


FIGURE V.14 : Profil vertical de température pendant la journée du 12 Juillet 1987  
(Scénario 3) (1 courbe toutes les 15 minutes)

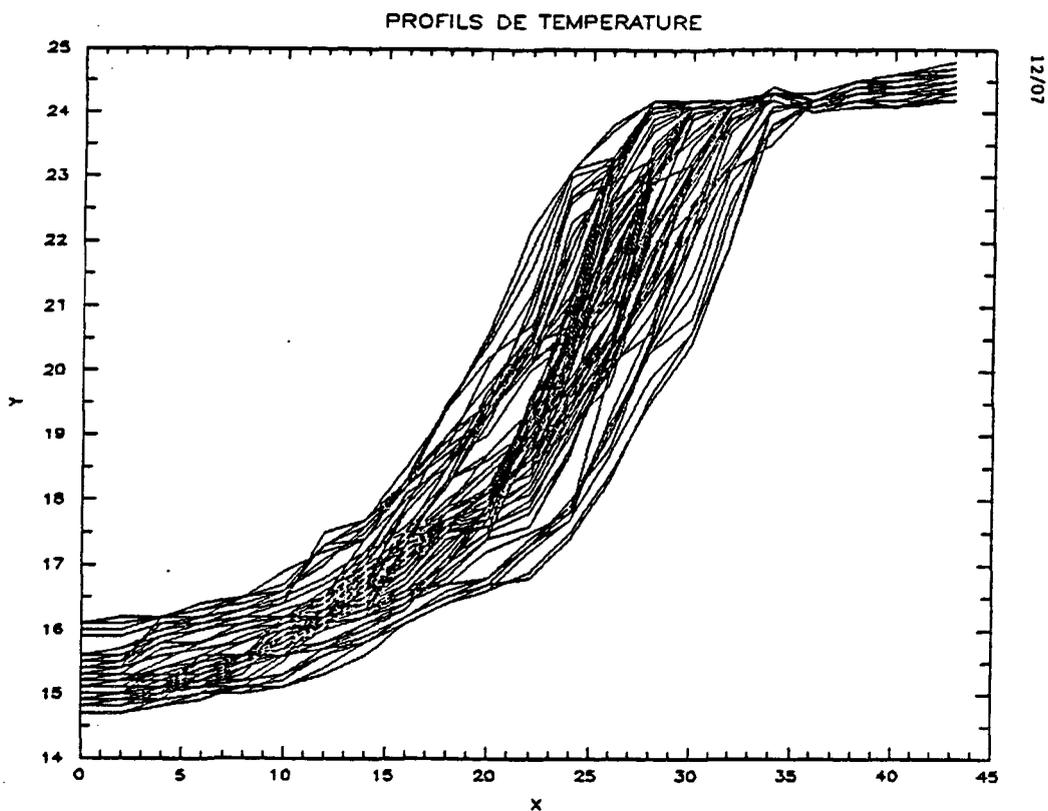
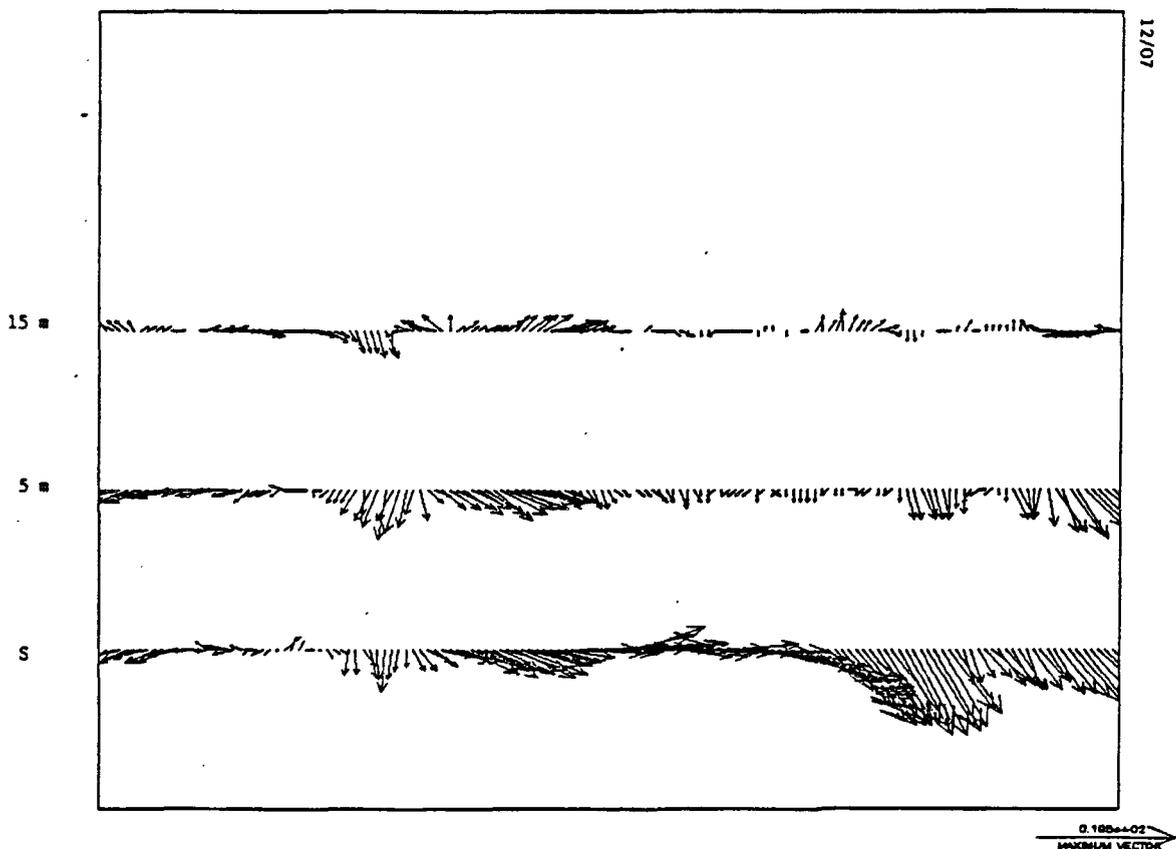


FIGURE V.15 : Vecteur courant en surface, à - 7 et - 15 mètres de profondeur pendant la journée du 12 Juillet 1987 (Scénario 3)



### C SCENARIO 3 EN MILIEU STRATIFIE - NUAGE EN PROFONDEUR -

Le troisième scénario correspond à une situation d'été. Le panache est bloqué vers 20 mètres de profondeur. En effet, le profil de température (*figure V.14*) montre une stratification de 8°C entre 15 et 30 mètres de profondeur.

Le courant horizontal est faible (*figure V.15*), et très variable en direction.

Les résultats pour les coliformes fécaux et les détergents sont montrés sur la *figure V.16*. A cause des courants très faibles, les concentrations trouvées autour de l'émissaire sont importantes, mais la limite du nuage n'est pas très éloignée du point d'émergence.

La lumière étant atténuée en profondeur, la disparition des bactéries est plus lente qu'en surface .

Le stock présent dans la zone est plus important que dans les scénarios précédents. On atteint l'équivalent de 65 heures de rejet (*figure V.10*), confinées dans un rayon de 1 kilomètre autour de l'émissaire.

Le nuage étant peu dilué, les polluants issus du rejet s'accumulent autour de l'émissaire, mais la zone d'impact est moins étendue. Néanmoins, un courant plus fort pourrait ensuite déplacer ce nuage et l'entraîner vers des zones plus côtières

### D. COMPORTEMENT DU REJET PARTICULAIRE

Le comportement des particules émises par le rejet a été également traité, en introduisant des vitesses de chute faibles.

Les résultats montrent des variations quasiment nulles dans le cas où les courants sont forts; le phénomène de chute n'ayant pas le temps de se développer pendant le parcours de l'émissaire à la sortie de la zone d'étude.

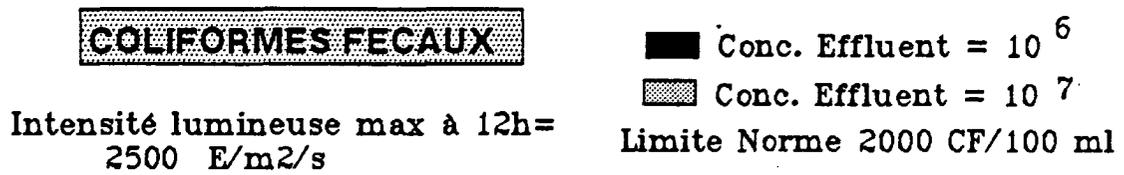
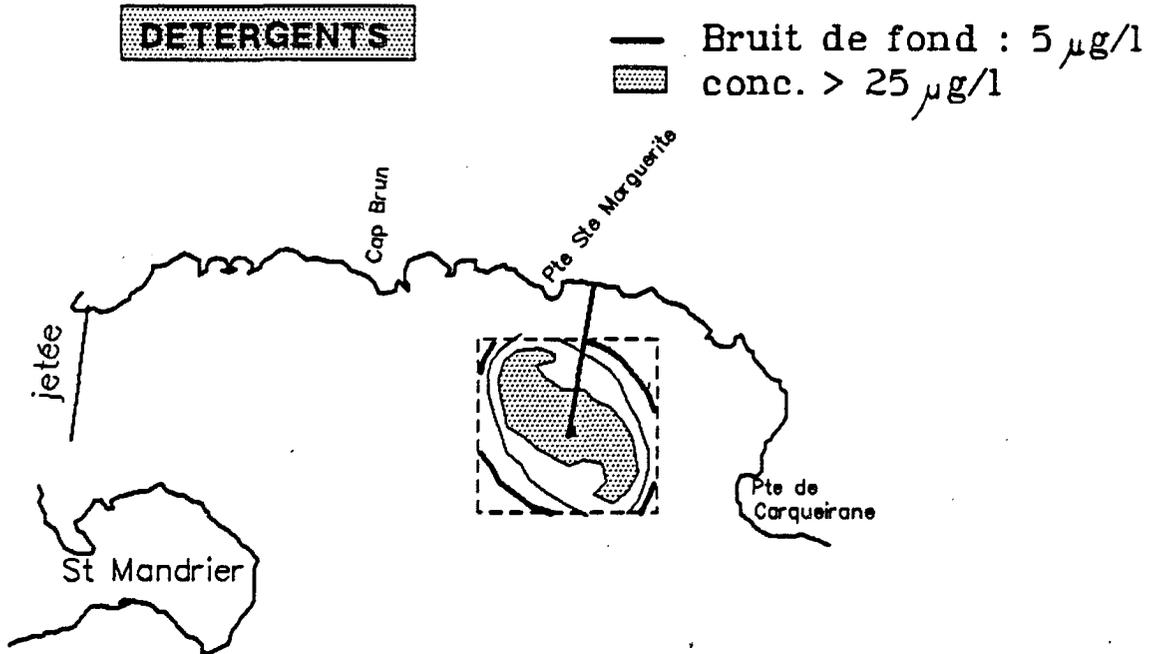
Lorsque les courants sont plus faibles et surtout tournants, le temps de résidence dans la zone étant plus long, on peut voir apparaître des différences de comportement pour le dissous et le particulaire. Lorsque le nuage est en surface, des particules peuvent apparaître dans les couches sous-jacentes et sortir de la zone, transportés par des courants différents en intensité et direction. Les concentrations restent néanmoins faibles, la vitesse de chute étant très petite. On n'observe pas de dépôt dans la zone autour de l'émissaire.

En milieu stratifié, les courants sont également giratoires et faibles. Les particules descendent donc dans la colonne d'eau et étant donné que le nuage est capté déjà en profondeur, elles ont des chances d'atteindre le fond dans la zone proche de l'émissaire. Le modèle est capable de calculer le pourcentage de particules du rejet qui est déposé dans la zone d'étude, mais celui-ci dépend beaucoup de la vitesse de chute utilisée.

La vitesse de chute dépend elle-même énormément de la taille et de la densité du matériel rejeté. Il est donc probable qu'un certain nombre de particules "lourdes" se dépose autour du rejet, lorsque le nuage est capté en profondeur et s'il est soumis à des courants très faibles. Mais il est difficile de quantifier ces dépôts, étant données la variabilité des courants au fond et l'incertitude très importante sur les vitesses de chute.

Les mesures de courantologie au fond ont montré des directions privilégiées vers le large c'est à dire vers la sortie de la rade (*figure V.17*).

FIGURE V.16 SCENARIO 3 : PANACHE CAPTE EN PROFONDEUR  
 COURANT ALTERNATIFS FAIBLES DE 1 à 5 cm/s  
 COUCHE DE 15 à 20 mètres  
 Concentrations maximales rencontrées



La cartographie des sédiments dans la grande rade de Toulon a montré une contamination localisée autour du rejet dans ces mêmes directions (*figure V.18*). D'autre part, la zone d'influence de l'effluent avait également été mise en évidence à l'aide de traceurs radioactifs par injection continue d'Hafnium radioactif qui se fixe sur le matériel particulaire. (BRISSET et al 1989). Les résultats ont montré une zone de dépôt dans le Sud-Ouest de l'émissaire (*figure V.19*).

Cependant, cette expérience a eu lieu pendant l'hiver, entre le 8 décembre 1988 et le 15 janvier 1989, c'est à dire lorsque le panache remonte en surface puisque le milieu est homogène en densité. Le modèle ne peut donc expliquer un tel dépôt à moins de prendre des vitesses de chute beaucoup plus importantes.

Il est possible d'autre part que le nuage subisse une recirculation dans la rade par les courants giratoires et reste dans la zone plus longtemps. Les particules auraient alors le temps de descendre, mais il est difficile de comprendre pourquoi on obtient une zone de contamination aussi clairement relié à la position de l'émissaire. Si les particules sont transportées et dispersées dans la rade par des courants tournants, elles devraient se déposer de façon presque aléatoire et non pas dans une direction caractéristique partant de l'émissaire, à moins que cette zone corresponde justement à une zone de dépôt privilégiée caractéristique de la rade de Toulon.

Le modèle actuel, appliqué à une zone de petite dimension dans laquelle on peut faire l'hypothèse d'un courant uniforme horizontalement, ne peut répondre à ce problème. L'échelle spatio-temporelle du phénomène de chute est trop différente de celle résolue par le modèle. Pour la prendre en compte, il faudrait étendre le modèle à la grande rade de Toulon au moins, si ce n'est à la région côtière, et donc calculer les courants par un modèle complet hydrodynamique. Celui ci doit être capable de reproduire la courantologie dans sa variabilité spatiale et temporelle sur une échelle de temps longue, compatible avec l'échelle de temps du phénomène de chute des particules (plusieurs jours).

FIGURE V.17

Pourcentage de rencontre des courants dans les différentes directions.  
 Courantomètres placés à 15 m sous la surface et au fond dans la Grande Rade de Toulon (Thouvenin et al 1988)

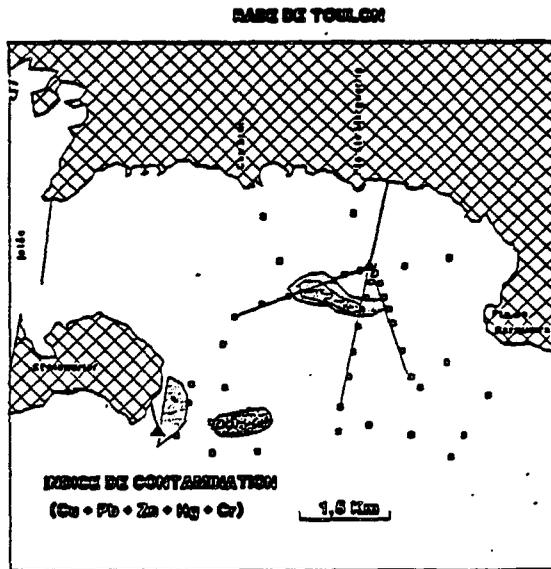
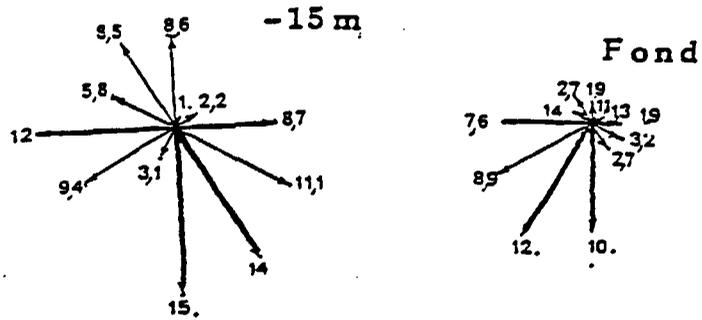
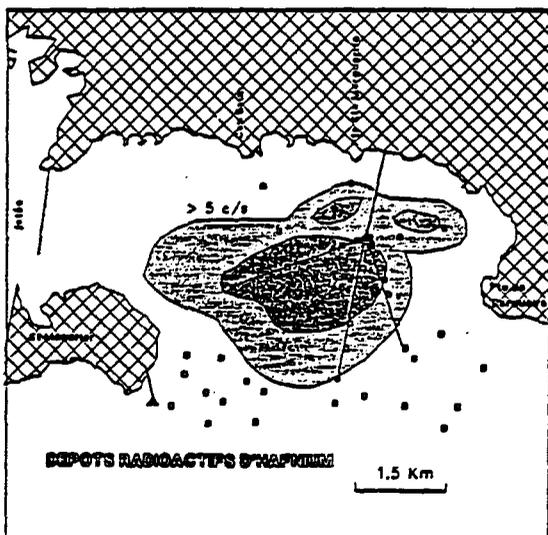


FIGURE V.18

Cartographie d'un indice général de contamination. Celui-ci a été calculé en divisant la concentration de chaque contaminant par la concentration "brut de fond" trouvée dans des sédiments propres équivalents, et d'ajouter les rapports obtenus les uns aux autres. La valeur 5 (cinq contaminants pris en compte) représente des sédiments propres (Arnoz, 1990).

LOARER et al (1990)



Debut de l'injection  
 08.10.88

Durée : 36 jours

Période : 46 jours

Bilan des dépôts

16 jours	28 %
33 jours	24 %
62 jours	23 %
104 jours	8 %

FIGURE V. 19

Cartographie des dépôts d'actinium (traceurs radioactifs) retrouvés dans les sédiments de la Rade de Toulon, après 35 jours d'injection continue à la sortie de la station d'épuration de Toulon-Est.

BRISSET, HOSLIN (1989) repris par ROMANA et al (1991)

## CONCLUSION DE L'APPLICATION DES MODELES AUX MESURES DE LONGUE DUREE

Les mesures de profil vertical de densité ont montré l'existence de profils "types" de stratification, mais la sensibilité du comportement du panache est telle que les éléments qui caractérisent ces profils "types" doivent être choisis dans des fourchettes très petites. On obtient alors de très nombreux cas ayant chacun une fréquence d'apparition faible et des durées de persistance courtes, le panache passant d'une profondeur à l'autre selon l'alternance des courants et les basculements de la thermocline.

Le modèle JET appliqué directement aux mesures permet tout de même de visualiser selon les saisons un comportement global du panache, et les variations de la profondeur de captage.

Les mesures de courants ont montré leur très forte variabilité, aussi bien en intensité qu'en direction. Seuls des "scénarios types" ont pu être reconnus, correspondants à des événements météorologiques majeurs.

Ces scénarios eux-mêmes sont un enchaînement d'états non stationnaires provoquant un transport et un mélange caractéristique de l'effluent, mais ils font suite généralement à de véritables états transitoires difficiles à caractériser. Ceux-ci dépendent de la situation courantologique antérieure et de la situation météorologique présente. Le modèle n'a pas été appliqué à de tels événements, bien qu'ils puissent correspondre parfois à des "accidents" en terme d'impact sur la côte par exemple.

Le modèle a été appliqué à trois scénarios types :

- En milieu homogène, avec des courants faibles et tournants (régime de brise côtières)
- En milieu homogène, avec des courants forts et unidirectionnels par temps de mistral
- En milieu stratifié, avec des courants très faibles et giratoires.

Les résultats du modèle donnent des indications sur les stocks de polluants concentrés autour de l'émissaire et sur la zone d'impact du rejet, notamment pour certains paramètres prioritaires : les germes tests (coliformes fécaux) et les détergents.

Pour les bactéries, l'importance de la concentration initiale à la sortie de l'émissaire est retenue, ainsi que l'influence de la lumière sur leur mortalité. La norme de qualité des eaux de baignade est atteinte à des distances très différentes selon que l'on se place au petit matin ou en fin d'après midi.

La prise en compte du phénomène de chute pour les particules issues du rejet ne peut être correctement réalisée. En effet, l'échelle de temps de ce phénomène est trop grande par rapport à la dimension de la zone d'étude. Le devenir des particules et leur dépôt potentiel dans la région côtière ne peut être abordé qu'à travers une modélisation à plus grande échelle des courants et du transport sédimentaire.



## CONCLUSION GENERALE

Un des objectifs du programme REJETS URBAINS était de :

**"déterminer les processus qui gouvernent en zone côtière le transport physique et les transformations physico-chimiques et biologiques, des polluants issus des rejets urbains"**

La démarche choisie pour atteindre cet objectif a été l'observation du milieu par des mesures de longue durée et l'utilisation de modèles mathématiques.

En effet, les modèles mathématiques, complétés par des études d'observation sur le terrain et des expériences spécifiques en laboratoire, sont de remarquables outils de synthèse. Ils permettent de mieux comprendre l'imbrication des différents processus et de visualiser globalement les situations rencontrées. D'autre part, la possibilité de tester les résultats en modifiant certains paramètres ou certaines conditions du milieu leur confère un caractère soit de prévision soit d'outil de recherches et d'études.

La démarche utilisée en général est de choisir des outils de modélisation simples, permettant de focaliser les efforts sur certains phénomènes, pour en simplifier d'autres ; une préétude ayant déterminée quels processus peuvent être négligés ou moyennés et quels processus doivent être pris en compte dans toute leur complexité.

C'est ainsi que des modèles analytiques ou empiriques, dont les résultats sont traduisibles en abaques, ont été développés dans le passé, permettant une utilisation aisée et une visualisation rapide des résultats. (BROOKS 1959 - ABRAHAM 1965 - KOH 1971 - DE BOUARD 1976 - SCHAU 1978 - SOGREAH 1975 1982 - LAM *et al* 1984

Ces modèles ont été confrontés à la réalité par l'intermédiaire de mesures en laboratoire et plus sporadiquement en mer. De nombreuses publications traitent de ces sujets, notamment en ce qui concerne l'étape de remontée de l'effluent du fond vers la surface.

La première étape de mélange, due à la tension de cisaillement développée par l'ascension du rejet, a lieu sur une petite échelle de temps et d'espace (quelques minutes sur quelques dizaines de mètres). Moyennant des théories simplificatrices pour traiter statistiquement la turbulence en recherchant des solutions stationnaires, il est possible d'obtenir des résultats satisfaisants, dans la mesure où l'on s'intéresse à une échelle spatio-temporelle plus grande, correspondant au devenir de l'effluent sur plusieurs kilomètres et pendant plusieurs heures.

Cette méthode a été utilisée dans ce programme d'études et le modèle de la SOGREAH a été appliqué, en utilisant les mesures de courants et de stratification réalisées sur le site. L'utilisation du modèle proprement dit, au lieu des abaques simplifiées, a permis de tester toutes les situations rencontrées en mer, en évitant les hypothèses du type courant négligeable ou milieu homogène ou bien encore croissance linéaire de la densité avec la profondeur.

Il n'en est pas de même pour la deuxième étape de mélange, qui est celle de la dilution et du transport par les courants horizontaux. Les modèles simples, utilisés pour évaluer la concentration à une certaine distance du rejet, font un certain nombre d'hypothèses qui ne conviennent plus aux échelles de temps et d'espace concernées par cette étape. Parmi ces hypothèses, la plus utilisée est celle du régime permanent, qui suppose que les fluctuations de courants sont soit très rapides soit très lentes par rapport à l'échelle de temps du phénomène.

A travers des mesures de courantologie et de stratification et à l'aide de modèles moins contraignants quant aux hypothèses, le programme REJETS URBAINS a permis d'étudier les erreurs commises par ces modèles simples.

En particulier, l'hypothèse de régime permanent occulte par définition les situations transitoires qui peuvent pourtant être des cas importants à étudier en terme de risque d'impact sur une zone donnée. Notamment, l'installation d'un vent fort suivant une période de vent calme et alternatif (du type régime de faibles brises côtières courantes en Méditerranée) peut entraîner dans les premières heures l'arrivée d'un nuage de pollution concentré, qui n'est pas pris en compte si on ne regarde que l'état permanent.

D'autre part, la variabilité des courants en zone littorale est très importante, autant en intensité qu'en direction, et ce à l'échelle de quelques heures. Le temps pour que l'état stationnaire soit atteint dans une zone de un ou deux kilomètres autour du rejet est supérieur au temps de persistance d'une situation courantologique donnée, surtout lorsque le courant est faible.

L'hypothèse de courants uniformes est applicable seulement dans la mesure où l'échelle de la zone d'impact du rejet est faible par rapport à celle de la variation spatiale du courant. Nous nous sommes intéressés dans ce programme à une zone relativement proche de l'émissaire, dans laquelle les concentrations d'une majorité de paramètres issus du rejet sont encore mesurables. A partir des campagnes pluridisciplinaires sur le terrain, et du suivi pendant plusieurs heures de l'effluent marqué, on a pu constater qu'à l'échelle de cette zone les variations temporelles du courant étaient bien plus importantes que les variations spatiales tout au moins dans le plan horizontal. Dans la mesure où on s'intéresse ici aux processus de mélange et de transformations plutôt qu'à l'impact proprement dit du rejet de TOULON sur les côtes, nous avons donc pu faire cette hypothèse d'uniformité des courants horizontaux.

Si la zone d'étude est étendue à la région côtière afin d'étudier le devenir à plus long terme de l'effluent, notamment les processus lents de transformations qui l'affectent et les phénomènes de chute de particules, cette hypothèse ne peut plus être invoquée. Le modèle utilisé dans le cadre de ce programme n'est plus applicable, tout au moins dans son développement actuel.

En effet, le modèle de transport et mélange qui a été développé dans le cadre de ce programme ne calcule pas les courants dans la zone.

Certains auteurs ont tenté de calculer à l'aide de modèles plus ou moins complexes les courants induits par le vent. Par exemple en baie de Cannes, SABATON (1978) et BOULOT *et al* (1977) ont reproduit un champ de vitesse tridimensionnel dans le cas d'un vent permanent en tenant compte de la géométrie exacte des fonds ou en la schématisant par une plage rectiligne à pente constante. La SOGREAH (1982) a développé deux modèles EOLE et CREOLE pour obtenir les répartitions verticales des vitesses horizontales dans le cas d'écoulement dus à un vent permanent dont la direction fait un angle donné par rapport à la côte.

Actuellement, des modèles de courants de plus en plus sophistiqués sont développés, pour décrire la circulation tridimensionnelle dans les zones côtières méditerranéennes (MARCER 1990). Malheureusement, quelque soit la complexité des processus pris en compte (traitement ou non de la turbulence par exemple), ces modèles se heurtent aux problèmes des conditions aux limites ouvertes, qui dépendent fortement de la circulation à grande échelle encore mal connue et liée à la météorologie, phénomène non périodique et très variable.

D'autre part, la nécessité d'utiliser des modèles tridimensionnels rend les études très coûteuses et difficiles à mener pour un résultat encore incertain tout au moins dans le domaine appliqué. Ces modèles sont encore du domaine de la recherche, mais pourraient déboucher sur de nouvelles applications dans les années à venir.

En alternative à un modèle hydrodynamique, l'IFREMER a donc choisi, dans ce programme sur les REJETS URBAINS en Méditerranée, de mettre l'accent sur des mesures de courantologie et

d'hydrologie, de longue durée, afin de préciser la variabilité et l'intensité des mouvements que subit l'effluent en arrivant en mer.

L'analyse de ces mesures de longue durée devait faire ressortir des situations types, caractéristiques d'un vent, et rencontrés avec une forte fréquence. Or cette étude a montré que la variabilité temporelle était telle qu'il était impossible d'isoler de telles situations "stationnaires". La zone étudiée est suffisamment littorale pour que les écoulements soient liés à des phénomènes locaux de "couche limite" et d'ondes répercutées par les fonds et la côte.

Des "scénarios types" liés à l'évolution de la météo pourraient être plus facilement mis en évidence, , mais cette étude demanderait plus de moyens quant au nombre de points de mesures et au traitement des résultats.

Le modèle de transport et mélange utilise donc des données de courants tirées directement des mesures réalisées en plusieurs profondeurs. Il fait l'hypothèse de l'uniformité horizontale des courants et il considère que la profondeur est constante dans toute la zone. Le champ d'application est limité par des frontières ouvertes, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de côtes dans la zone, ni d'obstacle perturbant les écoulements. On se place donc dans le cas d'un émissaire rejetant relativement loin de la côte, dans une zone où la topographie n'est pas trop accidentée.

Par contre, ce modèle prend en compte le transport différentiel entre les couches qui induit une distorsion possible du nuage dans plusieurs directions selon la profondeur. Il simule également le transfert entre les couches à travers la diffusion verticale et la chute des particules.

Le nombre et la répartition de ces couches sont choisis en fonction de la profondeur d'étalement du nuage de pollution, et en fonction du profil de courant.

L'application de ces deux modèles :

- JET et PANACHE pour la première étape de remontée de l'effluent jusqu'à la surface ou une profondeur de captage
- TRANSPORT et MELANGE pour la deuxième étape d'advection-dispersion par les courants horizontaux et les transferts verticaux

a permis d'analyser le comportement de l'effluent après son émission en mer dans différentes conditions du milieu.

\* **A partir du modèle JET**, on a pu déterminer l'importance du profil vertical de densité, qui, selon la position du gradient thermique, va entraîner un captage du panache à différentes profondeurs. Le comportement du panache évolue en fonction de la différence de densité entre le haut et le bas de la thermocline. Pour chaque débit et chaque forme du profil de densité, on obtient une stratification limite inférieure en dessous de laquelle le panache arrive en surface, et une stratification limite supérieure au dessus de laquelle le panache est capté en profondeur et reste relativement stable. Entre ces deux stratifications limites, le panache est instable; sa profondeur, son épaisseur et sa dilution varient beaucoup en fonction des conditions du milieu.

La confrontation des résultats de ce modèle avec les campagnes de mesures sur le terrain a montré une bonne adéquation. Par construction, le modèle ne reproduit pas les bouffées turbulentes qui introduisent une variabilité très importante dans les mesures et provoquent une répartition plus étalée du nuage sur la profondeur.

L'application de ce modèle est aisée et son exécution sur un ordinateur classique (type station de travail ou PC) est rapide. En tenant compte du profil exact des courants et de la stratification et si on dispose de données suffisantes, il permet de visualiser le comportement du panache (dilution et profondeur de captage par exemple) en fonction du temps. C'est ce qui a été

réalisé dans le cadre de cette étude, où l'on a montré le pourcentage de captage de l'effluent aux différentes profondeurs de Juin à Septembre 1987.

\* **A partir du modèle de transport**, on a pu déterminer les échelles de temps pour atteindre l'état stationnaire, et les dilutions qui dépendent des courants et des coefficients de diffusion utilisés. Les processus de diffusion verticale, de vitesse de chute et de floculation ont été testés, ainsi que le phénomène de disparition pour les bactéries pathogènes.

L'efficacité de ces processus par rapport au transport horizontal est à déterminer en comparant les échelles de temps; temps de résidence dans la zone d'étude par la connaissance des courants et temps de développement du phénomène par les cinétiques de transformations.

La confrontation des résultats du modèle avec les campagnes de mesures sur le terrain est également satisfaisante, compte tenues des incertitudes sur les données injectées dans le modèle et sur les mesures parfois hétérogènes dans l'espace et variables dans le temps.

Il semble néanmoins que ce modèle ne soit pas véritablement bien adapté au cas d'un panache bloqué en profondeur, mais il donne tout de même de bonnes indications sur le comportement du nuage.

Cette comparaison des mesures et des résultats du modèle a permis également de donner des ordres de grandeur pour les coefficients de diffusion horizontaux, qui semblent en première approximation être dépendant des courants en surface, probablement à cause de l'état de la mer qui y est associé (les courants étant le plus souvent induits par le vent) et qui provoque un mélange plus intense.

Enfin, l'application du modèle à quelques "scénarios types" a permis de visualiser la zone d'impact du rejet pour deux paramètres, qui ont été jugés importants dans les rejets urbains : les détergents et les germes tests. Les premiers sont supposés conservatifs à l'échelle de quelques jours, les seconds disparaissent avec une cinétique de mortalité fonction de la luminosité; cette loi a été mise en évidence par des expériences réalisées au cours de ce programme d'études.

On peut retenir de ces applications la notion de stock de polluant présent dans la zone, stock qui évolue en fonction du débit du rejet et des courants qui piègent l'effluent dans la zone ou le font sortir rapidement selon les heures de la journée et les jours.

On obtient ainsi des stocks très importants en profondeur, lorsque le nuage est capté dans des couches d'eau où les courants sont faibles et que l'effluent reste concentré dans la zone.

Les stocks sont moins importants en surface, mais le nuage étant plus étalé, les limites données par les normes de salubrité ou de toxicité sont parfois dépassées sur des distances assez importantes.

Ces distances qui décrivent l'impact du rejet sont très liées à la condition initiale dans le rejet et pour les bactéries au moment de la journée. En effet, l'impact d'un rejet bactérien est très faible pendant le jour, quand l'insolation provoque une mortalité rapide des bactéries. Par contre, on peut considérer que les bactéries sont pratiquement conservatives pendant la nuit ce qui donne une zone d'impact parfois très étendue au petit matin.

Cette différence entre la nuit et le jour pour les bactéries est importante à noter. Il est d'usage d'utiliser une disparition moyenne des bactéries à travers un  $T_{90}$  (temps nécessaire pour que 90% des bactéries meurent) fort. Ce  $T_{90}$  provient en général de mesures réalisées en pleine journée et ne convient pas pour évaluer l'impact d'un rejet pendant la nuit par exemple. Ce phénomène ayant une variabilité temporelle de l'ordre de quelques heures, il faut là encore comparer cette échelle de temps avec le temps de résidence. Dans le cas des rejets urbains en zone littorale, ces échelles de temps sont semblables, il est donc important de prendre en compte ce phénomène dans toute sa variabilité pour pouvoir décrire le comportement du rejet dans les conditions extrêmes.

En les associant à un programme de mesures important, les modèles utilisés pour ce programme REJETS URBAINS en Méditerranée ont bien permis d'étudier les processus qui régissent le transport et la dilution d'un effluent rejeté en mer par un émissaire profond. Certaines hypothèses classiques ont pu être évitées et testées et on a montré les limites de certaines simplifications en terme de prévision d'impact.

Etant donné la variabilité temporelle et spatiales du milieu côtier méditerranéen et faute de pouvoir calculer en routine les courants dans ces régions, il est encore impossible d'appliquer des outils simples de gestion. Il est, à l'heure actuelle, nécessaire de travailler à l'aide de modèles simples, en connaissant leurs limites et en s'appuyant sur la connaissance du milieu via un programme de mesures parfois important.



## BIBLIOGRAPHIE

- ABRAHAM G. (1963) – Jet diffusion in stagnant ambient fluid. DHL n° 29.
- ABRAHAM G. (1971) – The flow of round buoyant jets into ambient fluid flowing in a horizontal direction. DHL n° 81.
- BOULOT, PERNECKER, SABATON (1977) – Un modèle mathématique de courant induit par le vent dans des mers à marée très faible et son application à l'étude du transport et de la dispersion d'une tache polluée. AIRH 1977.
- BROOKS (1960) – Diffusion of sewage effluent in ocean current. Proc. First International Conference Waste disposals in the Marine Environment, E.A. Pearson (Ed.), Pergamon Press pp246–267
- CEA - BRISSET P., TOLA F. (1986) – Etude au moyen de traceurs radioactifs des rejets urbains en Mer Méditerranée. Station de Toulon Est. 1ère campagne expérimentale Juin 1986. Rapport ORIS/SAR/S/86-131/B 78.
- CEA - BRISSET P., CAILLOT A. (1986) – Etude au moyen de traceurs radioactifs des rejets urbains en Mer Méditerranée. Station de Toulon Est. 2ème campagne expérimentale. Octobre 1986. Rapport ORIS/SAR/S/86-138/B 79.
- CEA - BRISSET P., CAILLOT A. (1987) – Etude au moyen de traceurs radioactifs des rejets urbains en Mer Méditerranée. Station de Toulon Est. 3ème campagne expérimentale. Septembre 1987. Rapport ORIS/SAR/S/87-119/B 81.
- CEA - BRISSET P., HOSLIN R. (1989) – Etude au moyen de traceurs radioactifs des rejets urbains en mer Méditerranée. Station de Toulon-Est. Quatrième campagne expérimentale sur les dépôts. Octobre 1988 – Janvier 1989. Rapport ORIS/SAR/S/88-018
- CETE (1977) C. VALERIO – Etude de la diffusion d'un traceur fluorescent. Mesures des coefficients de diffusion turbulente.
- CHU et GOLDBERG (1974) – Buoyant Forced Plumes in Cross Flow. J. of Hydraulics Division ASCE n°100 – Septembre 1974.
- DE BOUARD S. (1976) – Méthodes simples pour évaluer la dilution d'un polluant à la sortie d'un émissaire marin. XIVième Journées de l'hydraulique. SHF. Question V. Rapport 6.
- ELDER (1959) – The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. Journal of fluid mechanics n° 5.
- FAN (1967) – Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids. California Institute of Technology. K-H-R-15.
- FAN et BROOKS (1969) – Numerical solutions of turbulent buoyant jet problems. California Institute of Technology. K-H-R-18.
- HUNT J.R. (1982) – Self similar particle size distributions during coagulation : theory and experimental verification. J. Fluid Mech. 1982. Vol 122 p. 169–185.
- HUNT J.R. (1982) – Particles dynamics in sea water : implications for predicting the fate of discharged particles. Environ. Sci. Technol. Vol 16 p. 303–309.
- HUNT J.R., PANDYA J.D. (1984) – Sewage sludge coagulation and settling in sea water. Environ. Sci. Technol. 1984 ; 18 ; 119–121.

- IFREMER (1986)** – Rapport Rejets Urbains – Station d'épuration de Toulon Est. Campagne de mesures sur l'effluent. 24–25 Juin 1985. Rapport Ifremer Rejets Urbains volet Méditerranée.
- KOH R.C.Y. (1971)** – On boyant jets – XIV<sup>ème</sup> Congrès de l'Association de Recherches Hydrauliques. 29 Aout–3 Septembre 1971. Volume 1. Hydraulic Research and its impact on the environment.(SHF–AIRH)
- KURIHARA (1965)** – On the use of implicit an iterative techniques for the time integration of the wave equation. U.S. weather bureau monthly weather review. Vol 93 p. 33–46.
- LAM D.C.L. – MURTHY C.R. SIMPSON R.B. (1984)** – Effluent Transport and Diffusion Models for the Coastal Zone – Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Vol 5.
- LAVELLE J.W., OZTURGUT E., BAKER E.T., TENNANT D.A., WALWER S.L. (1988)** – Settling speeds of sewage sludge in sea water. Environ. Sci. Technol. 1988, 22, 1201–1207.
- LOARER R., ARNOUX A., BODENNEC G., MARTIN Y., PAGANO G. (1990)** – Impact de l'émissaire de Toulon Est sur les sédiments de la Grande Rade. Aspects granulométriques, chimiques, bactériens et toxicologiques. Rapport IFREMER DRO/EM– 90–02 42 p + annexes.
- LOARER R. (1991)** – Comportement en milieu marin des particules issues de l'effluent urbain de Toulon Est – Aspects granulométriques. IFREMER DRO/EM/90–03.
- MARCER R. (1990)** – Simulation numérique 3D d'écoulements hydrodynamiques en milieu côtier à partir d'un modèle 'k- $\epsilon$ ' à deux équations supplémentaires pour la fermeture de la turbulence. Etude numérique– du couplage entre les processus hydrodynamiques et biologiques. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Institut de Mécanique Statistique de la turbulence . Marseille 1990
- MARCER R., FRAUNIE P., DEKEYSER I. (1990)** – Etude numérique d'écoulement en milieu côtier. Journal de Recherche Océanographique Aout 1990.
- MARTIN Y., BONNEFONT J.L. (1990)** – Devenir des micro–organismes d'intérêt sanitaire dans le milieu récepteur marin. Rapport programme Rejets Urbains, volet Méditerranée.
- MORTON – TAYLOR – TURNER (1956)** – Turbulent gravitotational convection from maintained and instantaneous sources. Journal of Royal Society of London. A 234.
- PIGNATEL J. (1989)** – Simulation de jets – Programme d'acquisition des données – Tracés graphiques des résultats. Rapport de stage Ifremer. Année 1988–89.
- POMMEPUY M., GUILLAUD J.F., MARTIN Y., DUPRAY E., DERRIEN A., CORMIER M. (1991)** – Le devenir des bactéries en zone littorale. Actes de colloque 11 "La mer et les rejets urbains". Bendor 13–15 Juin 1990.
- RAMADE – Cabinet GERIM (1988)** – Emissaire de Sainte Marguerite. Etude de la dispersion de l'effluent de Toulon Est dans le champ proche par rhodamine B. Expérimentation du 29 Avril 1988. Rapport + annexe
- RAMADE Cabinet GERIM (1991)** – Identification d'états type de courants et de stratification dans la grande rade de Toulon. Analyse fréquentielle à paraître.
- ROACHE (1985)** – Computational fluid dynamics. Hermosa publishers.
- ROMAÑA L.A. (1986)** – Programme Rejets Urbains – Volet Méditerranée. Etude du panache de rejet de l'émissaire de Sainte Marguerite à l'aide de marqueurs radioactifs. Résultats concernant les paramètres du milieu et du rejet urbain. Campagne des 18 et 19 Juin 1986. Rapport Ifremer DERO–86/32–EL.

- ROMAÑA L.A., BOUTIER B., MARCHAND M., LOARER R., BRISSET P., CAILLOT A., ARNOUX A. (1991) – Apports en micropolluants organiques et minéraux. La mer et les Rejets Urbains – IFREMER – Actes de colloques 11 – Bendor 13-15 Juin 1990 pp 153-170.
- SABATON M. (1978) – Etude de la dispersion des eaux de l'émissaire de Cannes – Journées de l'Hydraulique. SHF Question II. Rapport 11.
- SALOMON J.C., LE HIR P. (1980) – Etude de l'Estuaire de la Seine. Modélisation numérique de phénomènes physiques. Université de Bretagne Occidentale.
- SALOMON J.C., BRETON M., POMMEPUY M. (1990) – Intérêt d'un modèle de transport dissous pour les rejets urbains en zone estuarienne. La mer et les Rejets Urbains – IFREMER – Actes de colloques 11 – Bendor 13-15 Juin 1990 pp191-204.
- SCHAU H.C. (1978) – Simple model for Ocean Outfall Plumes. Journal of the Environmental Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol 104 – N°EE5- October 1978 – Technical Notes pp1026-1031.
- SOGREAH (1975) – Hydrodynamique des écoulements créés par le vent en zone côtière – Ministère de l'Équipement : Service Central Hydrologique – Rapport R 11 980 – Décembre 1975.
- SOGREAH (1981) – Mesures de la diffusion en mer. Etude de synthèse. Rapport 350554 R3. Janvier 1981.
- SOGREAH (1982) – Modélisation des écoulements dus au vent : prise en compte des gradients de densité, conséquences sur la diffusion verticale – Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie – Mission Spécialisée d'Inspection pour la lutte contre la pollution marine et fluviale – Octobre 1981)
- SOGREAH (1982) – Rejets en mer par émissaire. Guide pour l'étude du milieu marin.
- SOGREAH (1983) – Ministère de l'Environnement. Rejets en mer. Calculs simplifiés de la dilution.
- SOGREAH (1988) – Etude des rejets urbains – Logiciel de calcul de jets et panaches. Rapport 60087 R2. Septembre 1988.
- SOGREAH (1989) – Etude des rejets urbains – Analyse des courants marins et calcul de la transition entre jets et courants. Rapport 60087 R4. Février 1989.
- TAYLOR (1954) – The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proceedings of the Royal Society A. (Vol CCXXIII).
- THOUVENIN B., ROMAÑA L.A., LOARER R., JOLY R. (1988) – Programme Rejets Urbains – Volet Méditerranée. Cycle annuel de mesures physiques dans le milieu récepteur marin. Mouillage T0 dans la grande rade de Toulon. Rapport Ifremer + annexe. DERO-88-01-EM.

<b>ANNEXE 1</b>
-----------------

Le programme JET a été adapté pour les stations de travail SUN par Mr PIGNATEL qui a réalisé une interface utilisateur-logiciel aussi bien au niveau des entrées qu'au niveau des sorties.

A l'exécution du programme, une succession d'écrans apparaissent et proposent des menus, sur lesquels l'utilisateur peut cliquer au moyen de sa souris les choix qu'il retient et la suite des étapes à visualiser.

Quelques écrans sont présentés dans cette annexe ; notamment l'édition du fichier de données, avec celles caractérisant le rejet et celles caractérisant le milieu receptr; et également les écrans qui permettent de modifier les valeurs par défaut.

Ces valeurs par défaut sont notées nulles dans le fichier si l'utilisateur ne veut pas les modifier. Par l'intermédiaire des menus, il a la possibilité de tester d'autres valeurs. Ces paramètres sont en général des paramètres de calcul que seul un utilisateur averti, connaissant la méthode de résolution peut avoir besoin de modifier.

# CALCUL DES JETS EN MILIEU STRATIFIE

1 : Creer un fichier de donnees

2 : Charger un fichier de donnees

3 : Edition du fichier courant

4 : Modification des valeurs par defaut

5 : Simulation

Fichier courant : donjet2

- 1 : Donnees generales
- 2 : Donnees du milieu recepteur
- 3 : Parametres du rejet
- 4 : Retour au menu principal

Edition des donnees generales

Titre 1 :           IFREMER \*\* JET TRIDIMENSIONNEL

Titre 2 :           JET EMIS HORIZONTALEMENT

Titre 3 :           Ecoulement mer variable \* avec Coriolis

Fichier resultat :   @reh

Fichier deroulement : @red

ESC

Edition des parametres du rejet

1 : Diametre orifice d'emission ( d ) :	0.57 m .
2 : Debit du jet ( qo ) :	0.11 m <sup>3</sup> /s
3 : Angle du jet ( thetao ) :	0.00 deg
4 : Densite initiale du jet ( ro1 ) :	0.99950
5 : Cote d'emission du jet ( zmjet ) :	44.50 m



## Modification des valeurs par défaut

1 : Valeurs par défaut generales

2 : Valeurs par défaut du milieu

3 : Valeurs par défauts du rejet

4 : Retour au menu principal

## Modification des valeurs du milieu

Surface a la cote zmt

Non confine

0.00	0.00	0.00													

## Modification des valeurs du rejet

1 : Pesanteur ( grav ) :

0.0000

2 : Nombre de Schmidt ( rlam )

0.0000

3 : Pas d'edition des calculs du jet :

10

4 : Nombre de pas de calcul du jet ( hp

10.0000

5 : Limite maximale du pas ( hmax ) :

0.2000

6 : Progression du pas ( dds ) :

0.0000

## Modification des valeurs generales

1:Jet simple et ro1 impose	iprob =	0
2:Controle du calcul du jet	isvid =	1
3:Frequence d'edition	iedfq =	1
4:Arret au 2e changement de signe de ro	idfro =	0
5:Test d'arret du calcul sur la vitesse	umin =	0.0
6:Borne d'arret de l'ecart de densite	epsil =	0.0
7:Temps limite de simulation	tmax =	0.0
8:Pas de temps	deltat =	0.0
9:Cote de la prise d'eau	zrpris =	0.0
10:Nombre total de pas de calcul	nmax =	400
11:Coefficient de trainee du jet	cd =	0.0
12:Coefficient d'entrainement du jet	alpha =	0.0
13:Coefficient d'entrainement du courant	alphat =	0.0
14:Calcul avec alpha impose	ialph =	0
15:Traces 2D et 3D	idess =	0

ESC

## ANNEXE 2

### EXPRESSION DES FLUX VERTICAUX ENTRE LES COUCHES SCHEMA NUMERIQUE

#### A. SCHEMA POUR LES DERIVEES SPATIALES

Pour calculer à partir des valeurs moyennes, les valeurs approchées de la concentration locale et de sa dérivée par rapport à la verticale, on peut utiliser des artifices mathématiques plus ou moins complexes et précis. Mais dans beaucoup de cas, le terme d'advection fait apparaître des instabilités numériques qui rendent inutilisables des méthodes a priori plus précises.

La concentration et sa dérivée sont calculées au point frontière entre les couches en considérant les concentrations moyennes comme des concentrations locales reliées par une droite (interpolation d'ordre un) ou par une courbe du deuxième ou troisième degré (spline).

Ces méthodes centrées sont instables et la valeur théoriquement placée à la frontière entre les deux couches est décalée vers l'amont du courant. Ce décentrement dépend du gradient de concentration et la limite dépend elle-même du nombre de courant (lui-même est proportionnel au rapport entre la vitesse verticale et le pas vertical). Dans le cas d'interpolation d'ordre 1, la valeur limite du test est d'environ deux fois le nombre de courant. Si la fonction d'interpolation est d'ordre supérieur (parabole ou spline), le test doit être plus contraignant pour éviter les instabilités, et le décentrement plus fréquent provoque une diffusion numérique importante.

Le choix d'une méthode d'interpolation sophistiquée d'ordre 2 ou 3, gourmandes en temps calcul, n'apporte donc pas d'amélioration aux résultats.

En décentrant le schéma, les instabilités disparaissent mais au détriment d'une diffusion numérique d'autant plus forte que la vitesse de chute  $w$  et l'épaisseur de la couche sont grandes. Un décentrement amont à l'ordre un implique que la concentration à la frontière soit prise égale à la concentration dans la couche supérieure.

#### B. SCHEMA TEMPOREL EXPLICITE OU IMPLICITE

Le calcul des flux verticaux  $\Phi_z$  peut être réalisé de manière totalement explicite ou bien implicite, soit sur le deuxième pas correcteur, soit sur les deux pas successivement. L'avantage des méthodes implicites est de ne pas introduire de contrainte trop importante sur le pas de temps.

Des essais ont été réalisés pour comparer les deux méthodes et aucune différence significative sur les résultats n'a été relevée. L'importante diffusion numérique due aux échelles spatiales est la même dans les deux types de méthodes.

#### Essais avec une fonction gaussienne

Les caractéristiques de ces essais sont les suivantes:

- Ecart type de la gaussienne = 3 mètres
- Pas d'espace vertical = 2 mètres
- Vitesse verticale = - 0.1 mm/s
- Diffusion verticale nulle
- Simulation pendant 80 heures

L'aplatissement par diffusion numérique de la gaussienne en se déplaçant en fonction du temps est observé pour les différentes méthodes et schémas numériques testés.

#### Méthodes explicites :

Dans le cas où le décentrement vers l'amont est systématique, le schéma est bien sur très diffusif, le maximum diminue beaucoup (de 37% au bout de 20 heures, et de 64% au bout de 80 heures).

Dans le cas où le décentrement dépend du gradient de concentration, le maximum diminue de 4,5% au bout de 20 heures et de 30% au bout de 80 heures.

#### Méthodes implicites :

Les flux verticaux sont résolus implicitement et le même test sur le front (fonction du nombre de courant) est utilisé. Ces méthodes moins diffusives font apparaître de faibles valeurs négatives. Le maximum de la gaussienne diminue de 4,5% au bout de 20 heures et de 24,5% au bout de 80 heures.

#### Essais sur un front brutal de concentration

Les caractéristiques de ces essais sont semblables aux précédents. Le profil de concentrations initiales est en forme de marche d'escalier. Afin d'éviter un accroissement irréaliste des concentrations juste en amont du front, une diffusion non nulle est donnée, égale à  $10^{-05}$  m<sup>2</sup>/s. Les résultats des deux méthodes implicites et explicites sont les mêmes.

## CONCLUSION

En dépit des problèmes de diffusion numérique rencontrés, la méthode retenue est la plus simple. Le terme de diffusion ( $Kz \frac{dc}{dz}$ ) est traité à l'ordre 1, la dérivée étant calculée par différence à partir des concentrations moyennes des couches voisines. Le terme d'advection est calculé également à l'ordre 1 mais il est systématiquement centré si le nombre de Pecklet est inférieur à 1 (diffusion > advection verticale). Dans le cas contraire (Pecklet > 1), il est ou n'est pas décentré vers l'amont selon le gradient de concentrations.

La méthode explicite ou implicite sera utilisée, la deuxième ayant l'avantage de permettre un pas de temps plus grand.

## **ANNEXE 3**

### **RESULTATS DU PROGRAMME "JET" CAMPAGNES DE MESURES**

Le modèle "JET" a été appliqué aux différentes campagnes de mesures (Chapitre IV)

Les planches suivantes décrivent les résultats pour chaque campagne :

#### **CAMPAGNES EN MILIEU HOMOGENE :**

- C6 du 29 Avril 1988
- C7 du 27 Avril 1988
- C2 du 16 Octobre 1988
- C4 du 19 Juin 1987

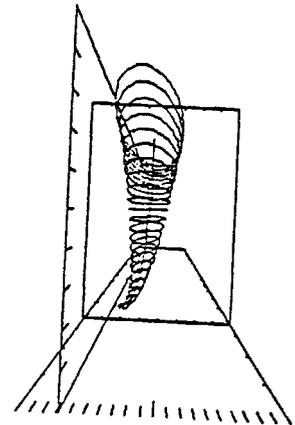
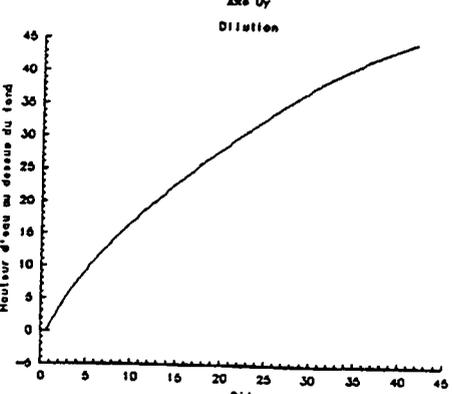
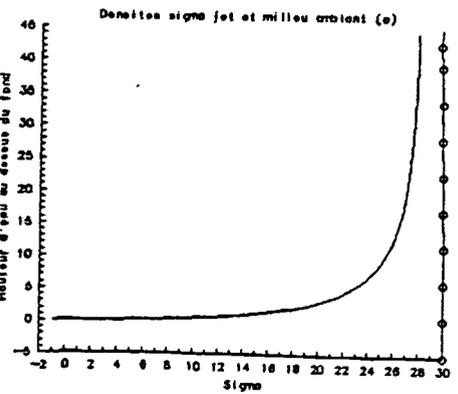
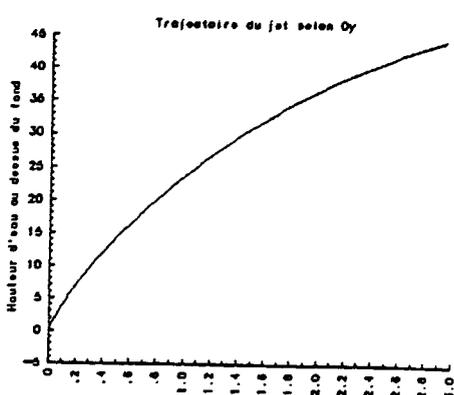
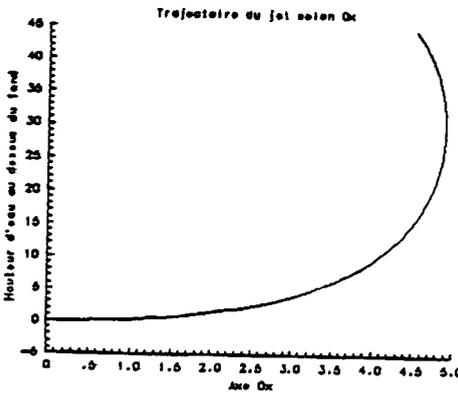
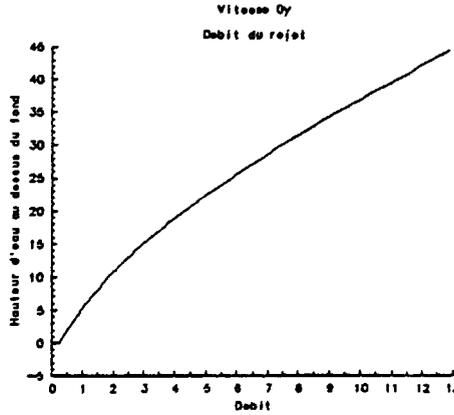
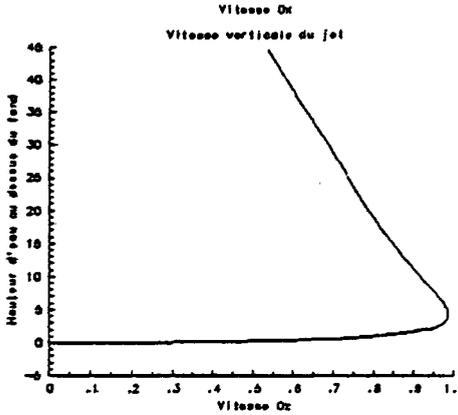
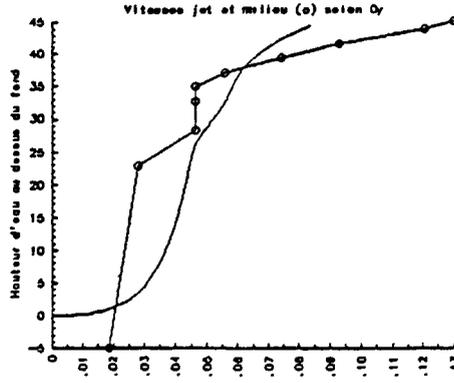
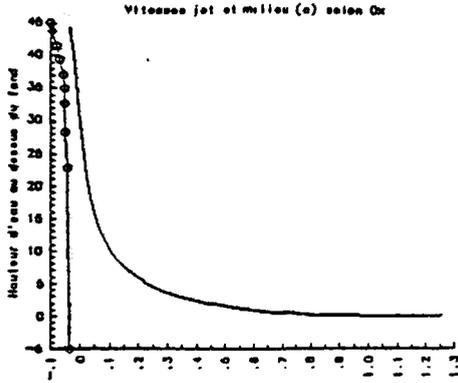
#### **CAMPAGNES EN MILIEU STRATIFIE :**

- C1 du 19 Juin 1986
- C5 du 8 Septembre 1987

CAMPAGNE DU 29 AVRIL 1988 - RESULTATS DU PROGRAMME JET

Debit du rejet : 0.3100 m<sup>3</sup>/s  
 Diametre de l'orifice : 0.5700 m

Profondeur d'emission : 44.5000 m  
 Densite initiale : 0.9991 t/m<sup>3</sup>



\*\* LE PANACHE ARRIVE EN SURFACE \*\*

Epaisseur finale du panache : 4.87 m  
 Debit du panache : 19.93 m<sup>3</sup>/s  
 Vitesse horizontale du panache : 0.01 m/s

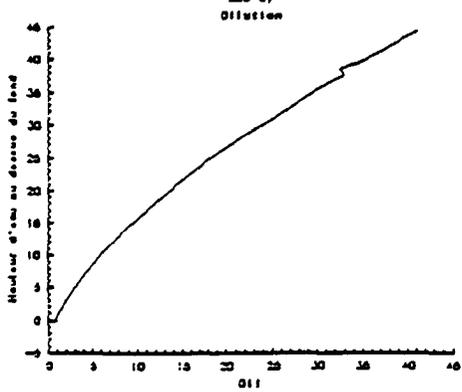
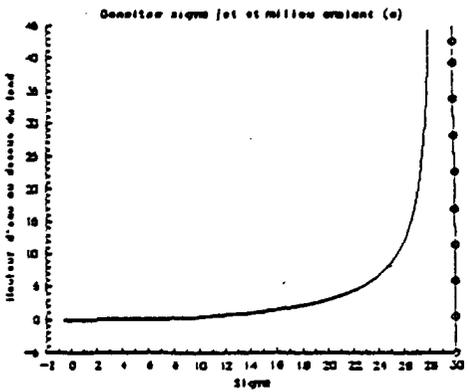
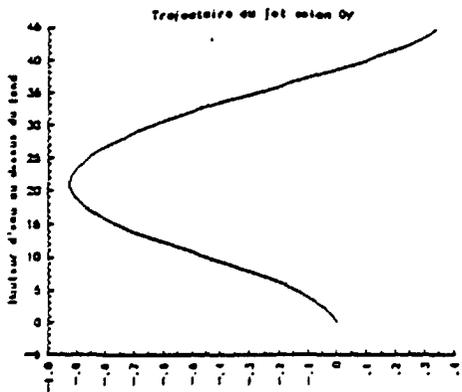
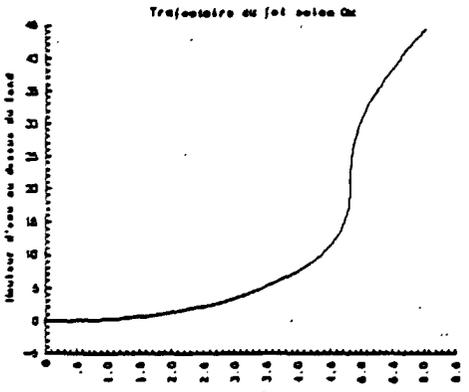
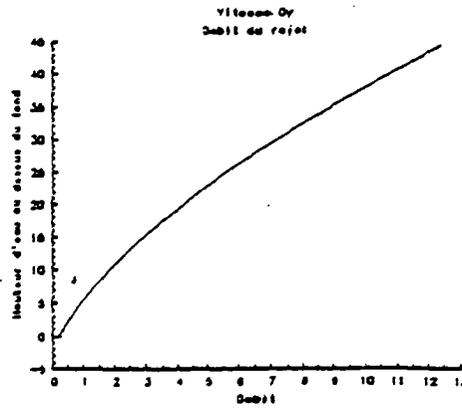
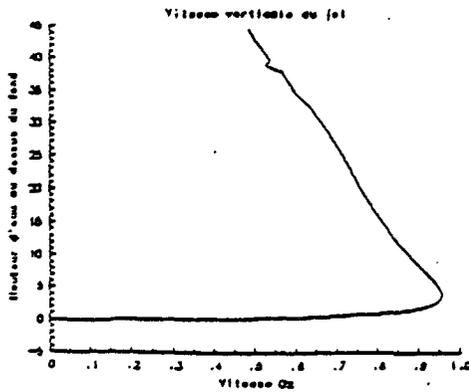
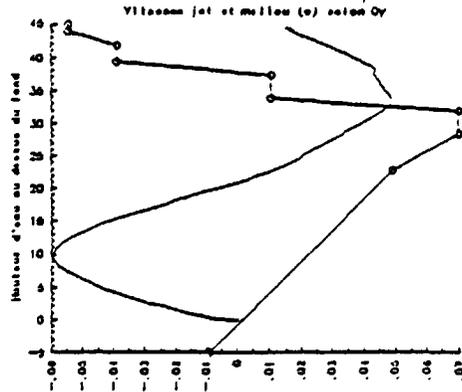
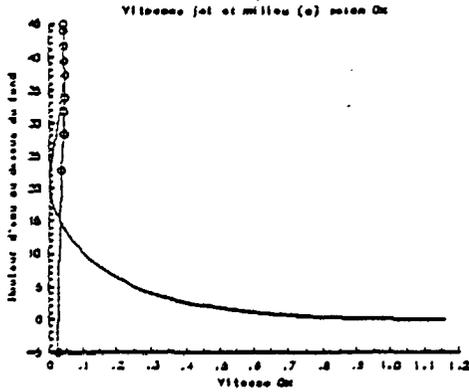
Diametre final du panache : 14.52 m

# RESULTATS DU PROGRAMME JET

## Campagne du 27 avril 1988

Debit du rejet : 0.2500 m<sup>3</sup>/s  
Diametre de l'orifice : 0.5700 m

Profondeur d'emission : 44.5000 m  
Densite initiale : 0.9994 t/m<sup>3</sup>



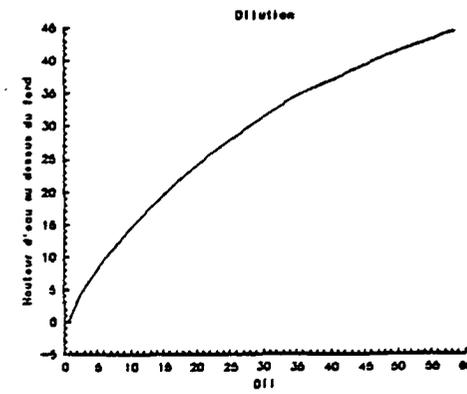
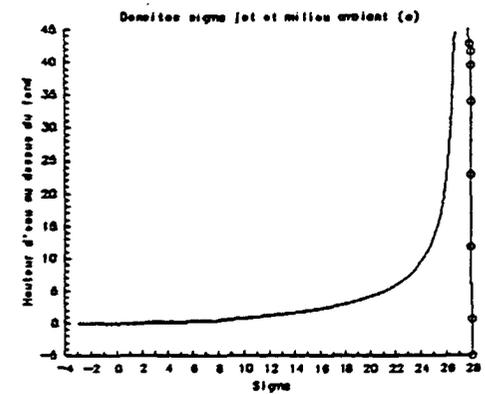
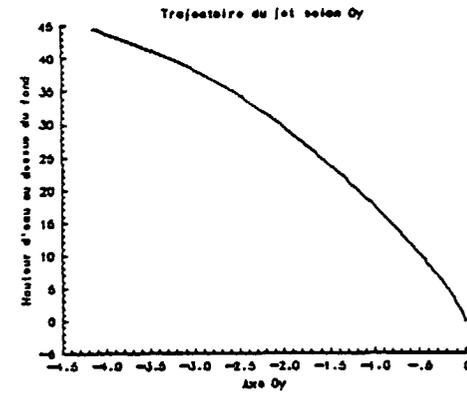
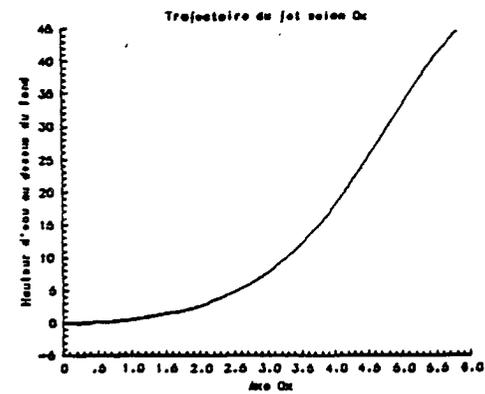
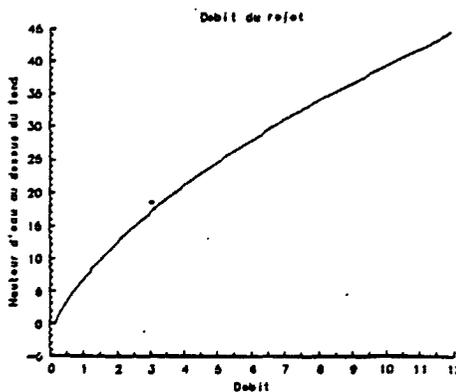
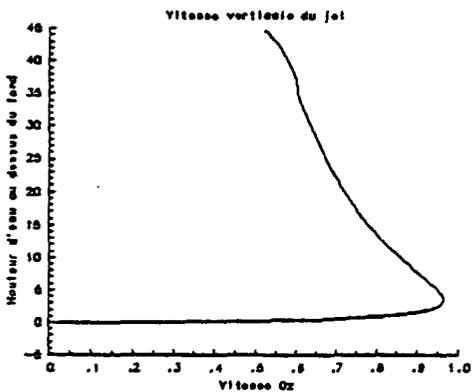
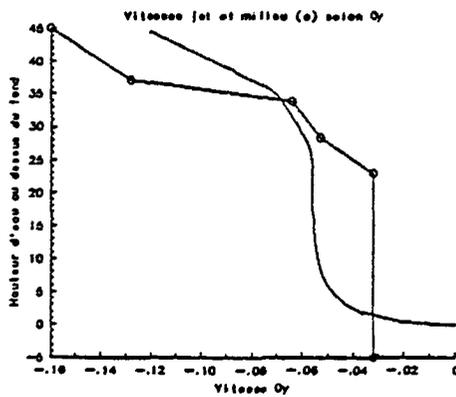
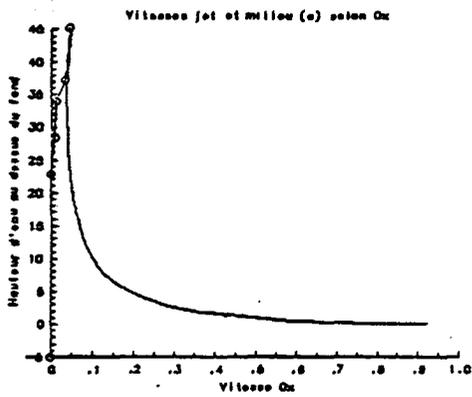
\*\* LE PANACHE ARRIVE EN SURFACE \*\*

Epaisseur finale du panache : 5.24 m  
Debit du panache : 19.34 m<sup>3</sup>/s

Diametre final du panache : 14.44 m

Debit du rejet : 0.22 m<sup>3</sup>/s  
 Diametre de l'orifice : 0.57 m

Profondeur d'emission : 44.5000 m  
 Densite initiale : 0.9971 t/m<sup>3</sup>



\*\* LE PANACHE ARRIVE EN SURFACE \*\*

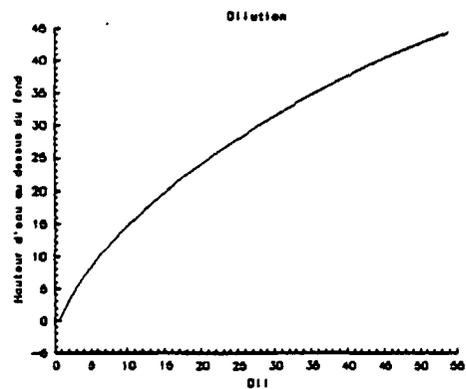
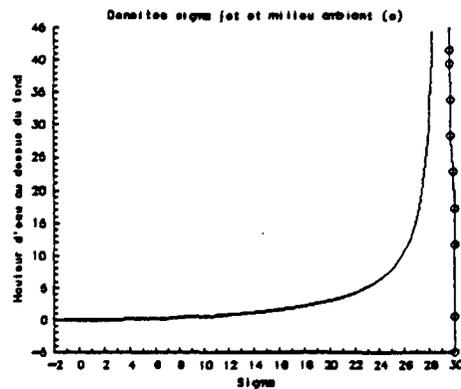
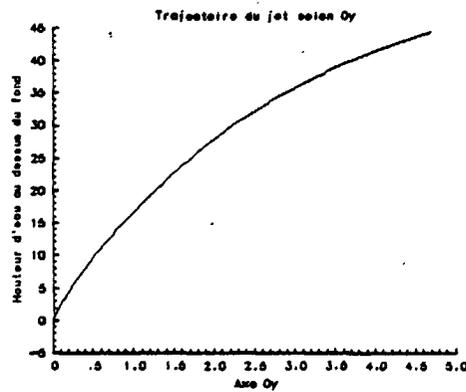
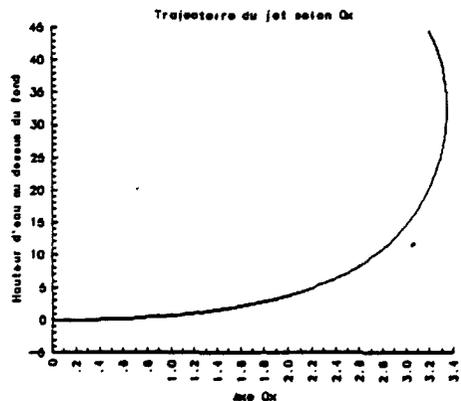
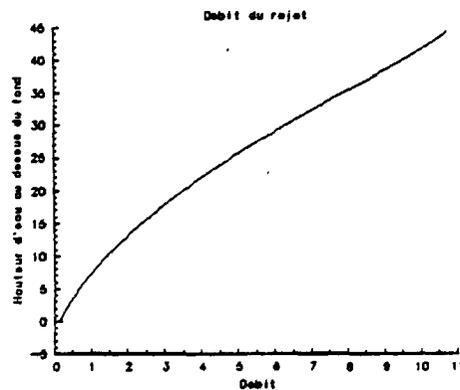
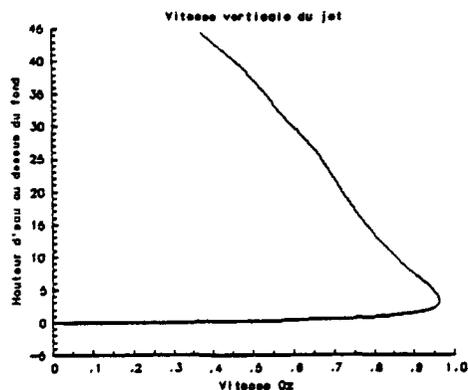
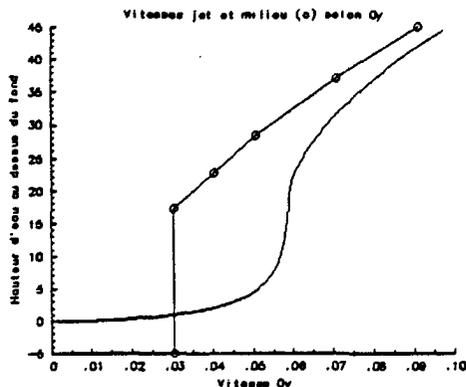
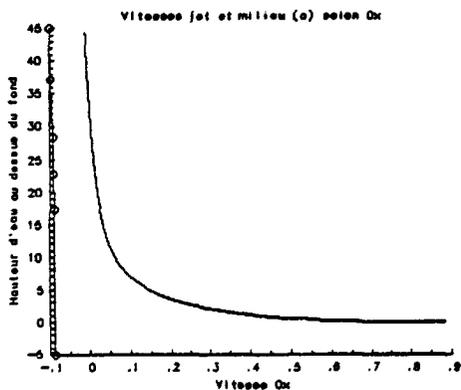
Epaisseur finale du panache : 5.91 m  
 Debit du panache : 15.49 m<sup>3</sup>/s  
 Vitesse horizontale du panache : 0.01 m/s

Diametre final du panache : 14.4 m

CAMPAGNE DU 19 JUIN 1987 - RESULTATS DU PROGRAMME JET

Debit du rejet : 0.2100 m<sup>3</sup>/s  
 Diametre de l'orifice : 0.5700 m

Profondeur d'emission : 44.5000 m  
 Densite initiale : 0.9981 t/m<sup>3</sup>



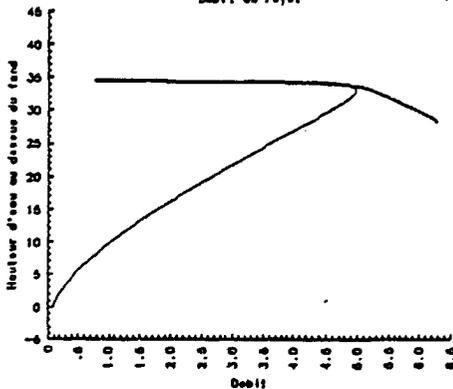
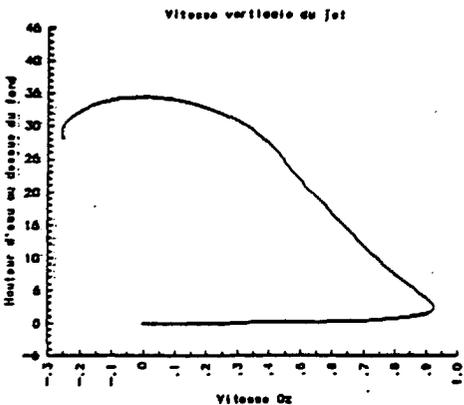
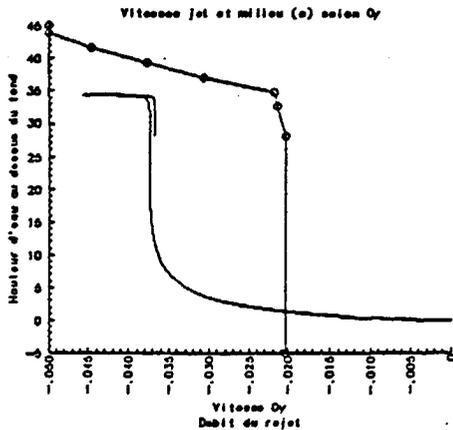
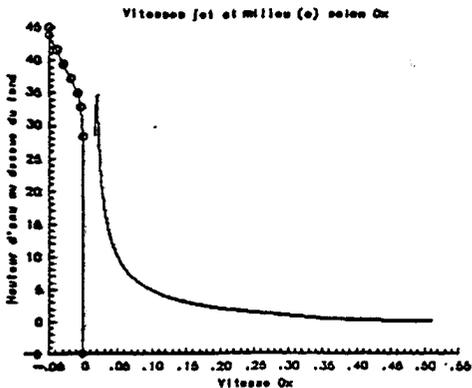
\*\* LE PANACHE ARRIVE EN SURFACE \*\*

Epaisseur finale du panache : 5.50 m  
 Debit du panache : 15.85 m<sup>3</sup>/s  
 Vitesse horizontale du panache : 0.01 m/s

Diametre final du panache : 15.1571 m

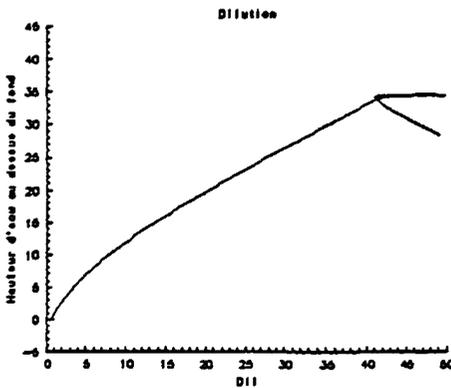
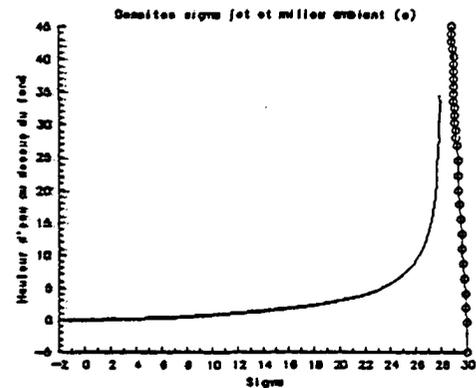
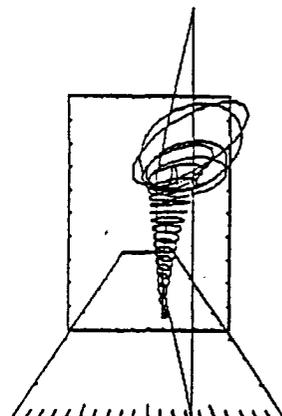
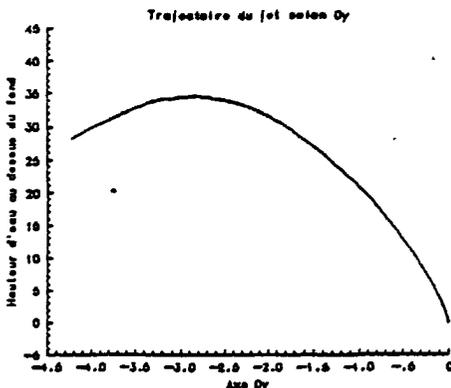
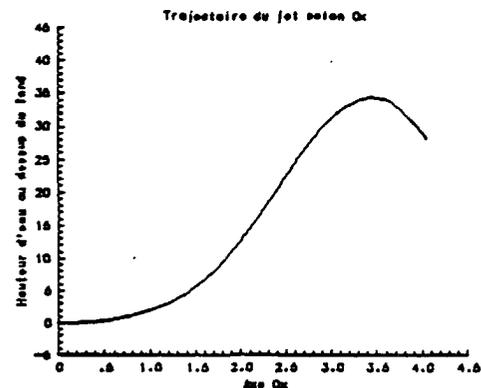
CAMPAGNE DU 19 JUIN 1986  
 Résultats du programme Jet

C1



Débit du rejet : 0.1200 m<sup>3</sup>/s  
 Diamètre de l'orifice : 0.5700 m

Profondeur d'émission : 43.5000 m  
 Densité initiale : 0.9981 t/m<sup>3</sup>



++ LE PANACHE EST BLOQUE EN PROFONDEUR ++

Epaisseur finale du panache : 3.2 m  
 Débit du panache : 9.76 m<sup>3</sup>/s  
 Vitesse horizontale du panache : 0.067 m/s

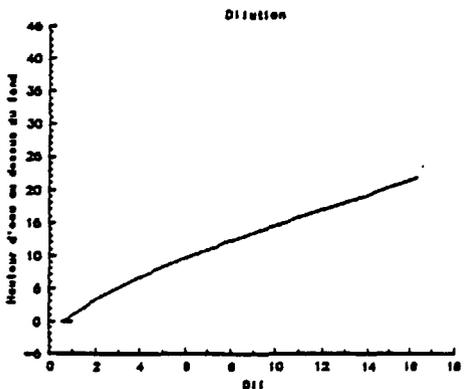
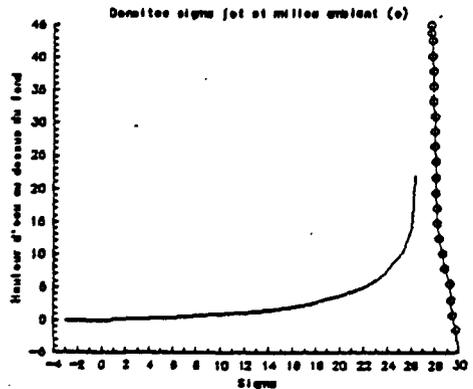
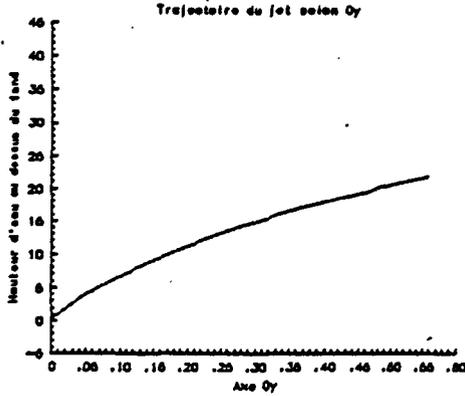
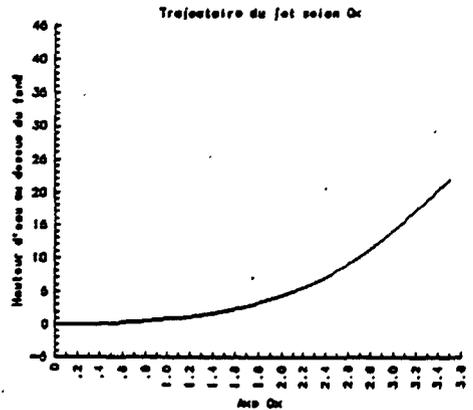
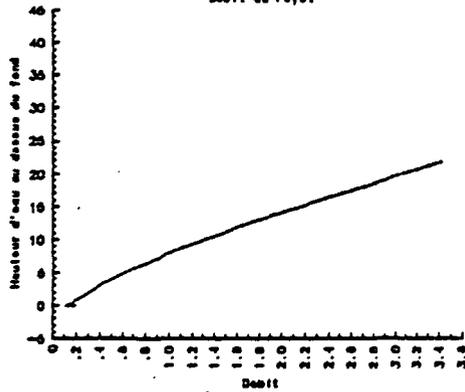
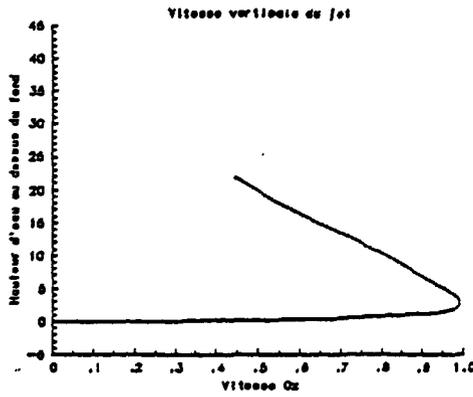
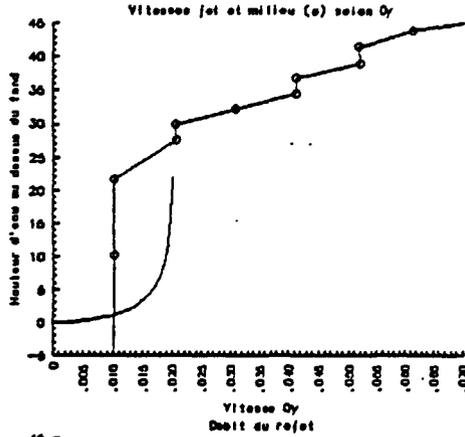
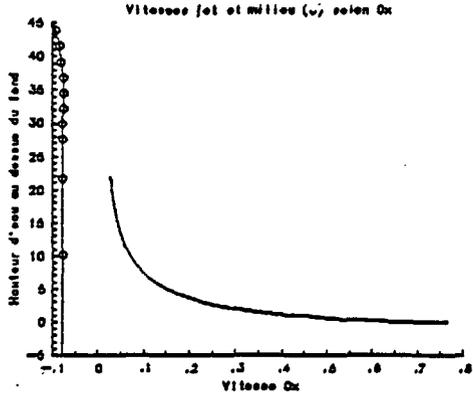
Diamètre final du panache : 14.28 m  
 Cote de bloquage : 15.23 m  
 Hauteur du dôme : 6.19 m  
 Cote supérieure du dôme : 9.03 m

CAMPAGNE DU 8 SEPTEMBRE 1987

Résultats du programme Jet

Debit du rejet : 0.1900 m<sup>3</sup>/s  
 Diametre de l'orifice : 0.5700 m

Profondeur d'emission : 42.5000 m  
 Densite initiale : 0.9971 t/m<sup>3</sup>



++ LE PANACHE EST BLOQUE EN PROFONDEUR ++

Epaisseur finale du panache : 1.94  
 Debit du panache : 5.29  
 Vitesse horizontale du panache : 0.11

m  
 m<sup>3</sup>/s  
 m/s

Diametre final du panache : 7.85 m  
 Cote de blocage : 20.84 m  
 Hauteur du dôme : 9.15 m  
 Cote superieure du dôme : 11.48 m

## ANNEXE 4

### APPLICATION DES MODELES AUX CAMPAGNES DE MESURES TESTS DE SENSIBILITE DES MODELES

Campagne C6 : Rhodamine du 29 avril 1988

#### SENSIBILITE DU MODELE JET :

Si on prend en compte la diminution de densité de l'effluent due à la température ou à la présence de la rhodamine, le débit du panache en surface et la différence de densité augmentent faiblement (jusqu'à  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1,9 \times 10^{-4}$  respectivement)

Si une stratification de densité est introduite en surface (entre 0 et 5 mètres), la différence de densité entre le panache et le milieu devient plus faible; les autres résultats (dilution, débit, vitesses, diamètre) varient très peu, excepté l'épaisseur de la tache qui augmente jusqu'à 6 mètres si une stratification même légère existe dans les premiers mètres sous la surface.

Les mesures de rhodamine dans le milieu ont montré que la couche marquée ne dépassait pas 5 mètres d'épaisseur; il semble donc que même si une stratification existe en surface, elle est détruite par l'action dynamique du panache qui homogénéise la couche dans la zone proche.

L'étalement densimétrique n'a pas été pris en compte dans le calcul de la SOGREA; ici avec un  $\text{dro}$  égal à  $1 \cdot 10^{-4}$  ( $2 \cdot 10^{-4}$  maximum), la vitesse radiale peut atteindre  $18 \text{ cm/s}$  (à  $21 \text{ cm/s}$ ) à 10 mètres de distance et sur une épaisseur de 1.5 mètre, ce qui n'est pas négligeable. A 30 mètres du centre du panache, elle est encore égale à  $8 \text{ cm/s}$  ( $9 \text{ cm/s}$ ) sur une épaisseur de 1.2 mètre.

#### TEST DE SENSIBILITE DU MODELE DE TRANSPORT ET MELANGE :

##### a. Reconstitution de l'étalement initial du panache

L'injection de Rhodamine étant variable dans le temps, le calcul des flux radiaux en état stationnaire n'est pas rigoureux. L'étalement en fonction du temps et sous forme d'anneau n'est pas facilement reproductible par le modèle. Trois solutions ont été testées :

\* **a1. en anneau** : le flux total est introduit dans la maille centrale à l'instant  $t$ . il se répartit progressivement et arbitrairement dans les 16 mailles voisines en 3 minutes.

Cette structure en anneau est advectée par le modèle. Or dans la réalité, l'anneau ne se déplace pas tout entier. La partie amont par rapport au courant moyen est en partie bloquée et doit contourner le panache de remontée à cause de la courantologie locale induite par le rejet. Seule la partie aval a donc été conservée représentant la tâche qui se déplace avec le courant moyen.

\* **a2. flux concentré dans une maille** : Le pic de concentration au centre du panache entraîne dans la zone proche du rejet une diffusion numérique importante qui reproduit un étalement fictif en surface.

\* **a3. Flux radiaux stationnaires** : les flux injectés sont répartis dans les 9 mailles centrées sur le rejet. Ils sont proportionnels au flux total entrant dans le milieu à un instant donné, et répartis arbitrairement (45% au centre, 0 à 10% en amont et 11 à 15% en aval du courant moyen).

### **Comparaison des trois simulations a1, a2, a3**

En comparant les résultats de ces trois simulations, on observe des cinétiques de décroissance pratiquement égales et des variations négligeables de la distance du maximum de concentration par rapport au rejet. Les largeurs de la tache en fonction du temps sont également très semblables.

En conclusion, étant donné le manque d'informations précises sur l'étalement du panache en surface et dans la zone proche (aucune mesure de rhodamine), il n'est pas possible de vérifier les dilutions calculées par le modèle dans cette zone. Comme il a été dit dans l'analyse de sensibilité précédente (chap III.1), il semble que la variation de la répartition des flux dans la tache initiale de surface n'induit pas de changement significatif sur la dilution au-delà de 100-200 mètres de distance (si l'étalement ne dépasse pas un échelle spatiale de 50 mètres).

### **b. Répartition dans le temps et durée de l'injection "ponctuelle"**

La représentation du flux injecté en surface a été testée. Ce flux peut varier dans le temps selon une gaussienne ou une demi-gaussienne, avec un écart type variable de l'ordre de quelques minutes.

Nous avons testé le modèle pour deux écarts types de 5 et de 10 minutes avec une demi-gaussienne. Les cinétiques de décroissance des concentrations ne varient pas, excepté au départ, dans la zone proche du rejet. Les écarts entre les concentrations sont faibles, et s'estompent rapidement dans le temps.

Le passage du flux injecté selon une gaussienne ou une demi-gaussienne n'induit pas non plus de variation significative dans les résultats.

### **c. Répartition sur la profondeur des flux injectés** **Épaisseur de la couche contaminée**

L'unique mesure disponible de l'épaisseur de la couche est celle donnée par le transect vertical réalisé 2h10mn après l'injection, en amont de la tache, à 300 mètres du rejet (*figure A4-1*). Cette mesure montre que la rhodamine s'est étalée sur une épaisseur de 4 mètres, la concentration est constante sur toute l'épaisseur et le front est très brutal, entre 4 et 5 mètres. A 5,5 m, la concentration est inférieure au seuil de détection du fluorimètre (RAMADE 1988).

Le programme "JET" de la SOGREAH donne une épaisseur d'étalement de l'ordre de 5 mètres.

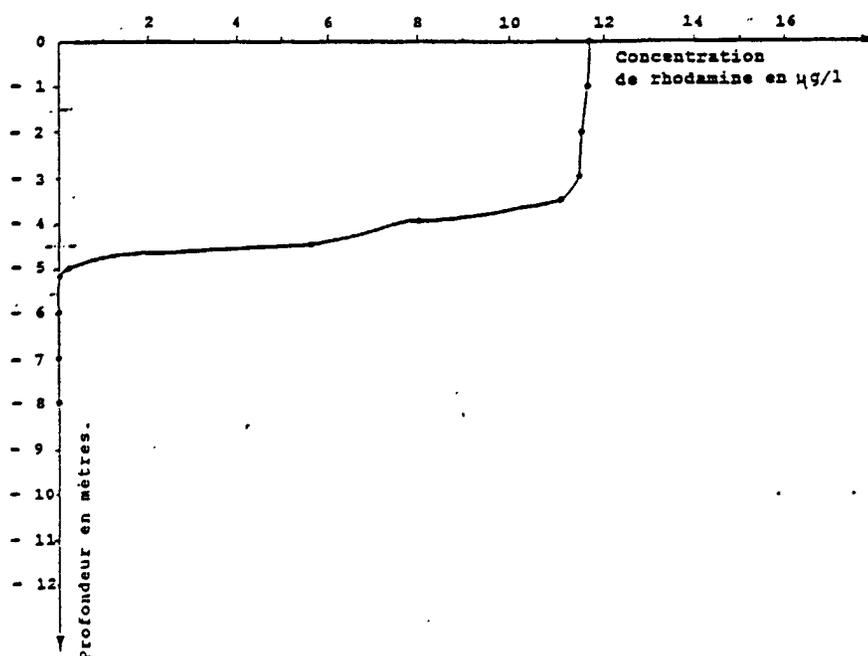
Si l'on se donne un flux de concentration non constant sur l'épaisseur de la couche, sa diffusion sur la verticale va dépendre du coefficient de diffusion verticale, donc du profil de stratification de densité.

Pour obtenir un profil de concentration constant sur l'épaisseur au bout de 2 heures, il faut soit que le pic initial de concentration en surface diffuse sur les premiers mètres grâce à un coefficient de diffusion suffisamment fort, soit que le flux injecté au départ soit réparti uniformément sur la profondeur. Excepté au début du rejet et dans les 500 premiers mètres du parcours, les résultats sont alors très semblables.

Des mesures de phosphate ont été effectuées dans la zone proche du rejet à une profondeur de 50 cm. Pour obtenir des dilutions qui aient un ordre de grandeur correcte, il convient de répartir le flux uniformément sur l'épaisseur de la tache. Cette option semble logique, étant donné la turbulence créée par le panache arrivant en surface qui est susceptible de détruire la stratification du milieu en surface et d'homogénéiser les concentrations de l'effluent sur toute l'épaisseur de son étalement.

FIGURE A 4-1

TRANSECT VERTICAL 2 H 10 APRES L'INJECTION A 300 M  
DU PANACHE DE REMONTEE EN AMONT DU NUAGE



d. Vitesses et directions des courants

Dans les premiers essais, nous avons pris des courants uniformes et constants dans le temps. L'observation des résultats nous a montré que la prise en compte de leur évolution temporelle était indispensable pour reproduire la décroissance des concentrations.

En effet, d'après les mesures de RAMADE, le courant varierait en surface de 5 cm/s à 9 cm/s pendant les 3 premières heures, et de 9 à 10 cm/s ensuite en fonction de l'accélération du vent. D'autre part, il est possible qu'il ait légèrement tourné.

Les mesures des courantomètres montrent que la direction du courant à - 5 mètres est différente de celle en surface (rotation d'environ 70°). D'après les mesures de rhodamine, il semble pourtant que la couche contaminée homogène en concentration ne subisse pas de cisaillement aussi fort. Nous avons donc choisi une variation lente du courant dans les premiers mètres.

Le fait que les courants aient tourné en fin de mission introduit un biais dans l'évaluation des distances au rejet et donc des cinétiques de décroissance des concentrations. En effet, si la tache a tourné, elle a effectué un trajet plus long que la distance mesurée en ligne droite du rejet au point de mesure. Cela peut expliquer également la difficulté à reproduire la forte réduction des concentrations pendant la dernière heure.

### e. Calage des coefficients de diffusion

#### Coefficient de diffusion verticale et profil de densité

Le coefficient de diffusion verticale  $K_z$  est une fonction du nombre de RICHARDSON. Etant donné la faible précision que nous avons obtenue pendant cette campagne sur le gradient de densité et de courant ainsi que sur les mesures trop ponctuelles, il est inutile de tester de façon précise la valeur des deux coefficients  $a$  et  $b$  dans la formule :

$$K_z = K_0 + K_1 \cdot (1 + a.Ri)^b$$

Nous les prenons égaux aux ordres de grandeur signalés au paragraphe III.4.1.

Il est évident que les résultats varient beaucoup selon les gradients de densité, notamment au niveau du front, à la limite inférieure de la tache. Si les courants entre deux couches sont différents en module et direction, une faible différence dans la valeur de  $K_z$  va conduire à des résultats variables dans les différentes couches.

#### Coefficient de dispersion horizontale

Le coefficient de dispersion horizontale est choisi uniforme sur la zone et variable en fonction du courant. Sa valeur détermine la largeur de tache et la dilution sur l'axe principal de transport.

Le nuage étant dans la réalité en forme d'anneau et dans le modèle en forme de tache circulaire, il est difficile de comparer les dimensions du nuage d'autant plus que ses limites ne sont pas précisément connues par la mesure photographique de la fluorescence.

#### Calage des coefficients

Les coefficients de diffusion horizontale et de diffusion verticale sont calés de telle façon que les résultats du modèle reproduisent les cinétiques de réduction des concentrations maximales relevées dans la tache en fonction du temps.

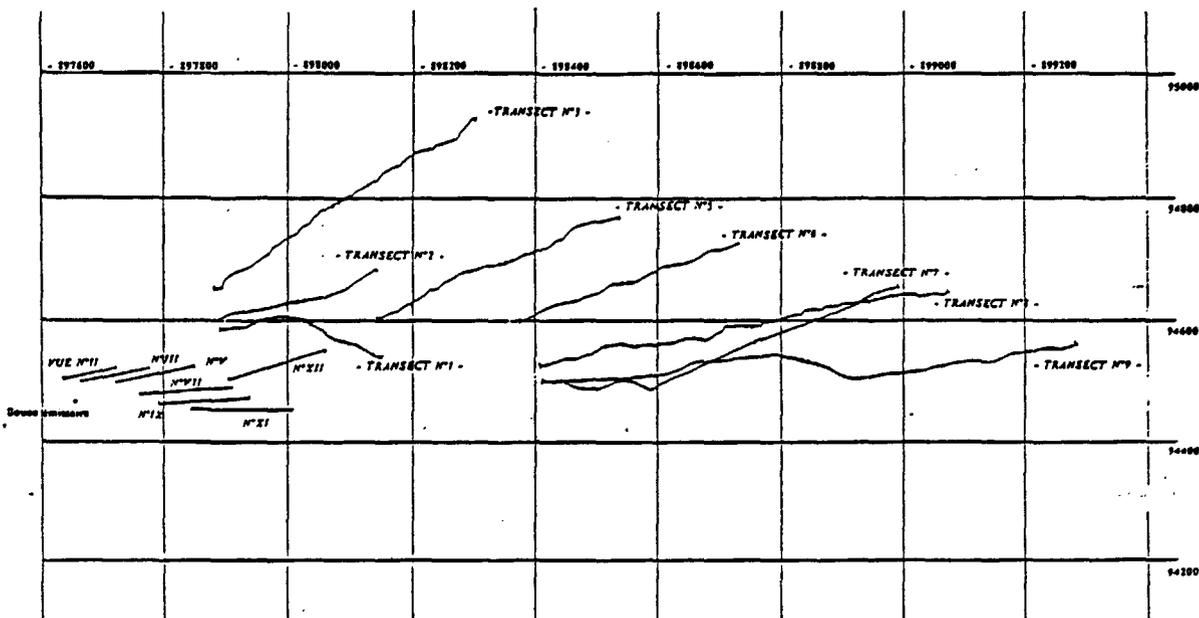
Ces cinétiques ont été calculées par RAMADE à partir des mesures de Rhodamine entre 1,5 h et 4,5 h après l'apparition du nuage en surface. Elles sont de l'ordre de 0.015 (minute<sup>-1</sup>). Pour des durées inférieures à 45', le coefficient de réduction exponentielle serait plus fort (de l'ordre de 0.03 environ).

Les maxims considérés sont ceux relevés sur les transects horizontaux, mais ceux-ci ne passent pas obligatoirement par le centre de la tache au moment considéré. La *figure A4-2* représentant l'ensemble des trajets des transects montre que ceux-ci n'ont pas toujours la même direction, soit que le déplacement de la tache n'ait pas été unidirectionnel pendant toute la mission, soit qu'étant donnée la forme en semi-anneau de la tache, il soit difficile de repérer en mer l'axe de transport principal de la tache. Les maxims relevés ne sont donc pas de parfaits "homonymes" et peuvent ne pas représenter les véritables maxims à un instant donné. Malgré ces restrictions, un ordre de grandeur des cinétiques de réduction peut être recherché afin d'évaluer les coefficients à introduire dans le modèle.

L'ordre de grandeur du coefficient de diffusion verticale est surtout choisi de telle façon que, pour des profils de densité et de courant "probables", il n'induisse pas de flux importants au-dessous de 5 mètres de profondeur, tout au moins pendant les deux premières heures.

FIGURE A4-2

TRAJECTOIRE DES TRANSECTS HORIZONTALS DE MESURES DE RHODAMINE



Les résultats du modèle montre que le coefficient de diffusion horizontale doit être assez élevé pour reproduire les dilutions et les cinétiques de réduction du maxima.

Un coefficient constant en fonction du temps et donc du courant ne permet pas de reproduire la décroissance pendant toute la durée du parcours de la tâche. Les derniers transects font apparaître des valeurs de concentrations plus faibles.

Celles-ci peuvent être dues :

- soit à l'accélération du vent et des courants qui entraînent une dilution accrue grâce à la turbulence créée par la tension de frottement du vent et le cisaillement des courants de surface par rapport aux couches sousjacentes,
- soit aux positionnements de ces transects ne passant plus à travers la partie la plus concentrée du nuage.
- soit à une diffusion verticale importante

Pour reproduire cette décroissance des concentrations, on est obligé de tenir compte de l'accélération des courants et de l'augmentation du coefficient de diffusion horizontale en résultant.

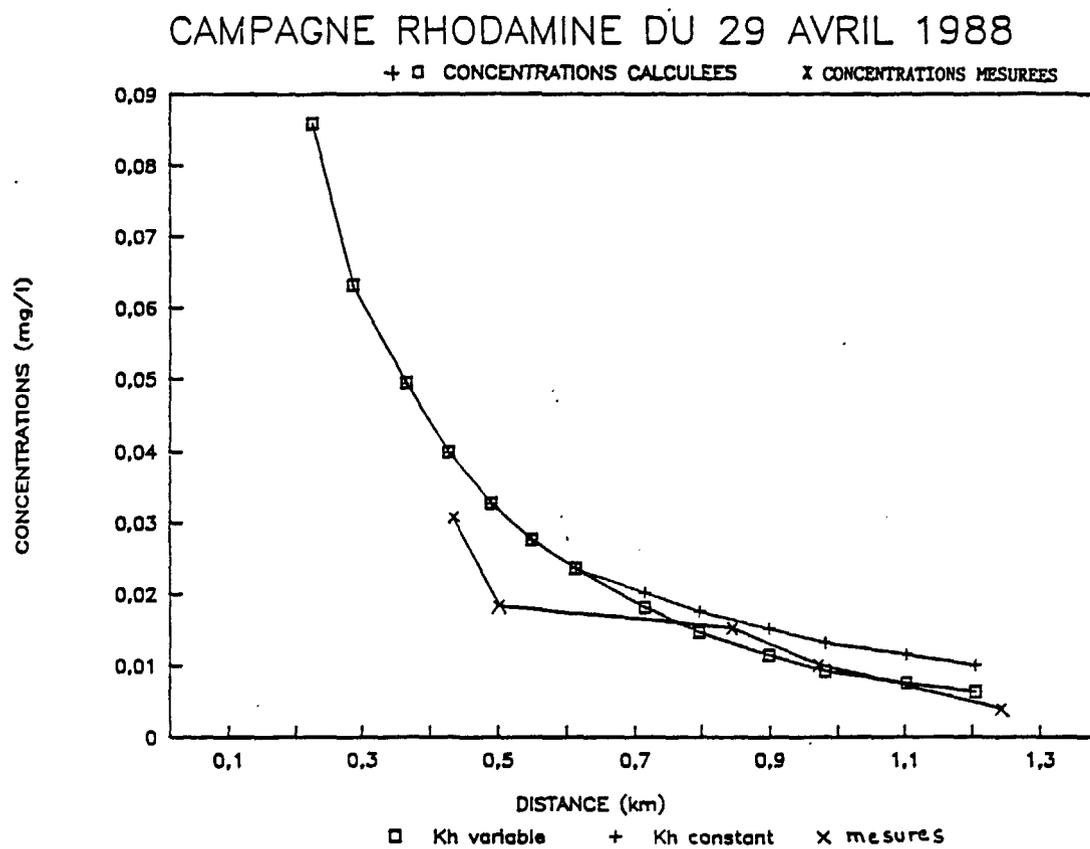
Les courants étant calés grâce aux distances des maxima par rapport à l'émissaire, le coefficient de diffusion est alors recherché en ajustant les valeurs des concentrations. La fiche C6 (*annexe 5*) présente les valeurs du coefficient  $K_h$  variables en fonction du courant et donc du temps et de la profondeur.

La cinétique de décroissance calculée ainsi est égale à  $0.014 \text{ mn}^{-1}$ , la concentration passe en surface de  $754 \mu\text{g/l}$  15 mn après le début de l'injection à  $6.2 \mu\text{g/l}$  au bout de 4 heures.

Si on ne tient pas de compte de l'évolution du coefficient de diffusion horizontale en fonction du courant, la cinétique de décroissance tombe à  $0.010$ , la concentration en surface est égale à  $10 \mu\text{g/l}$  au bout de 4 heures. Sur la *figure A4-3* sont tracées les concentrations de rhodamine mesurées et calculées par le modèle dans les deux cas de diffusion horizontale,  $K_h$  constant ou variable.

FIGURE A4-3

EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DANS LE NUAGE EN FONCTION DE LA DISTANCE



Campagne C2 : le 16 octobre 1986
----------------------------------

Pour les différents tests, la comparaison des résultats du modèle avec les mesures est réalisée en relevant les distances à partir desquelles les dilutions caractéristiques sont atteintes. Le tracé des courbes  $C/C_0$  en fonction de la distance est comparé à celles provenant des dilutions mesurées pour le traceur radioactif.

#### a. Condition limite à l'émergence du panache

La condition limite à l'émergence du panache a été de nouveau testée dans cette campagne. Sur la *figure A4-4* :

- la courbe en gras correspond aux mesures in situ;
- la courbe en trait plein correspond à la condition limite "panache", exprimée par des flux répartis sur les 9 mailles du "champ proche".;
- la courbe en trait tiré correspond à la condition limite "concentré", exprimée par un seul flux injecté dans une seule maille représentant le panache.

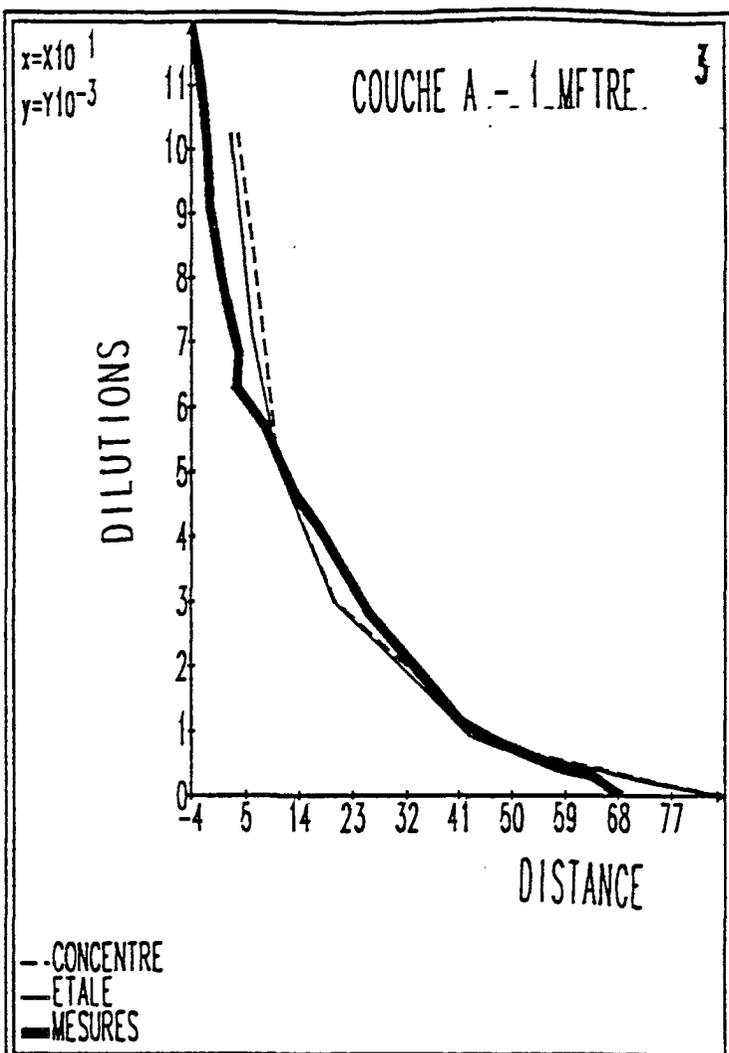
La comparaison des résultats montrent que de légères différences sont visibles à moins de 300 mètres, mais elles sont négligeables par rapport à l'écart entre les dilutions calculées par le modèle et celles mesurées par le CEA.

#### b. Vitesses de chute

Nous avons tenté de reproduire l'apparition de traceur à -12 mètres en jouant sur la valeur des courants et sur celle du coefficient de diffusion verticale. L'or  $Au^{198}$  est un marqueur des particules, il est soumis comme elles au phénomène de sédimentation. Une vitesse de chute a donc été introduite.

Avec un coefficient de diffusion verticale  $K_z$ , calculé en fonction de la stratification (*figure A4-5*), trois vitesses de chute ont été testées :  $w_s = 0$ ;  $= 0,1$  et  $= 1$  mm/s.

Les résultats avec la vitesse de chute nulle sont très proches de ceux avec la vitesse de chute très faible (0,1 mm/s). Par contre, une vitesse de chute forte (1 mm/s) provoque des concentrations trop faibles en surface, et une descente trop rapide des particules. A -12 mètres, les deux vitesses de chute faibles donnent des ordres de grandeur correctes au delà de 400 mètres, mais ne reproduisent pas l'apparition de produits avant 300 mètres.



$W = 0.5 \text{ mm, s}^{-1}$      $Kz \text{ max} = 0,001$

FIGURE C 4-4  
Comparaison des profils  $c/c_0$   
en fonction de la distance  
pour 2 conditions à la limite "panache"

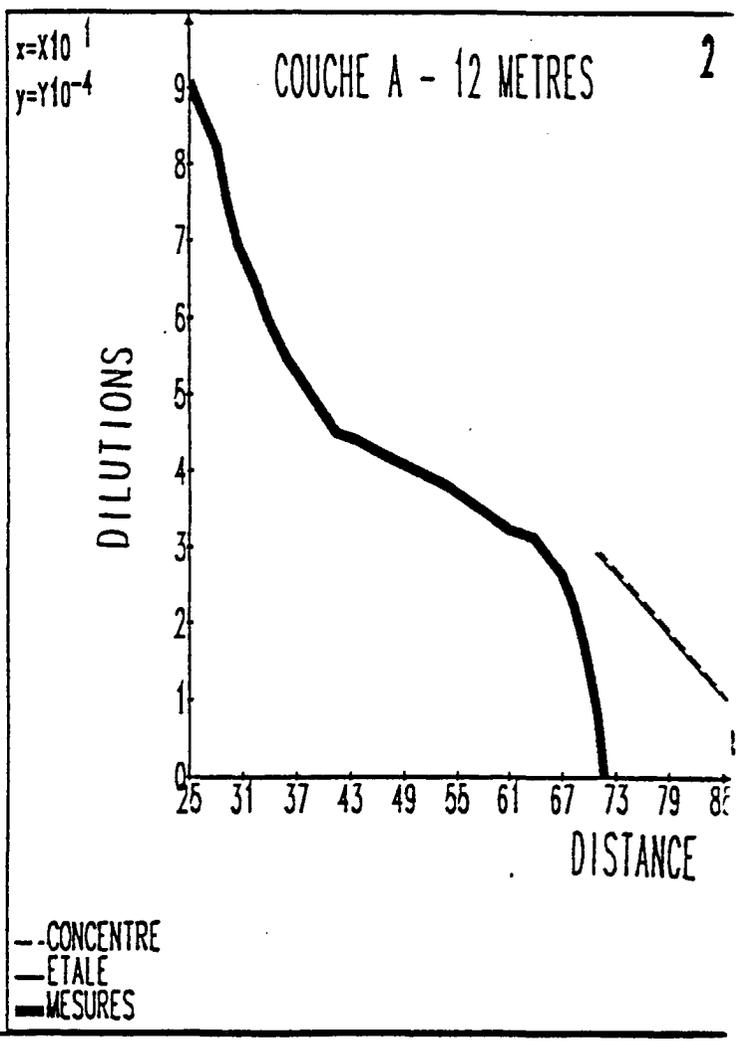
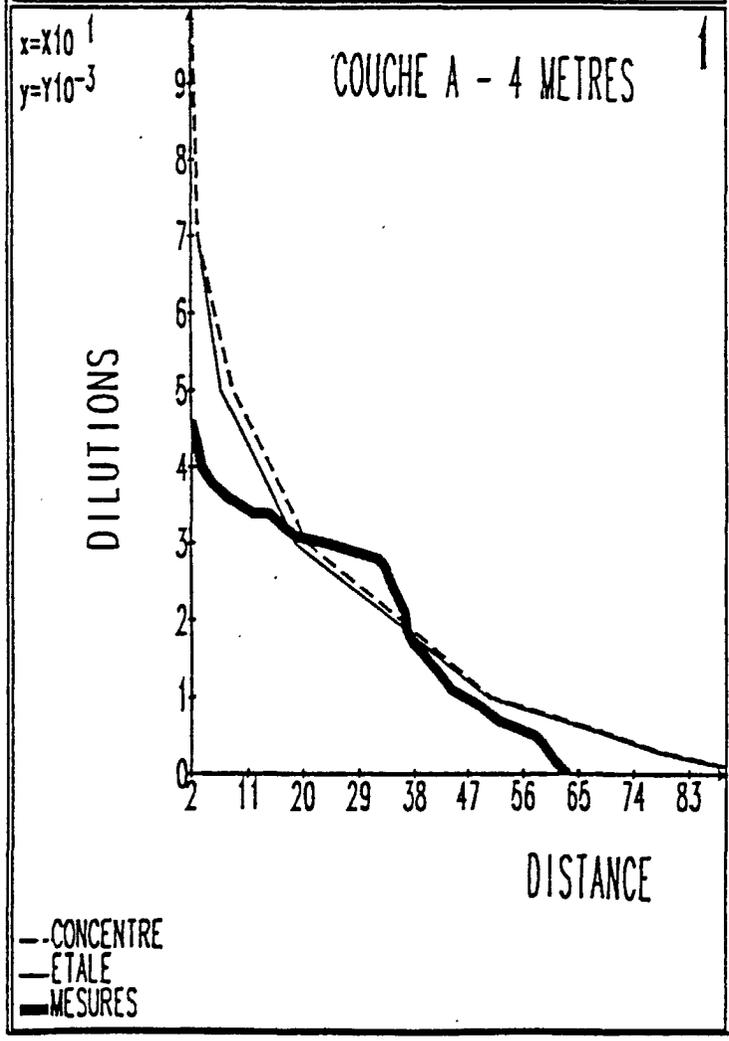
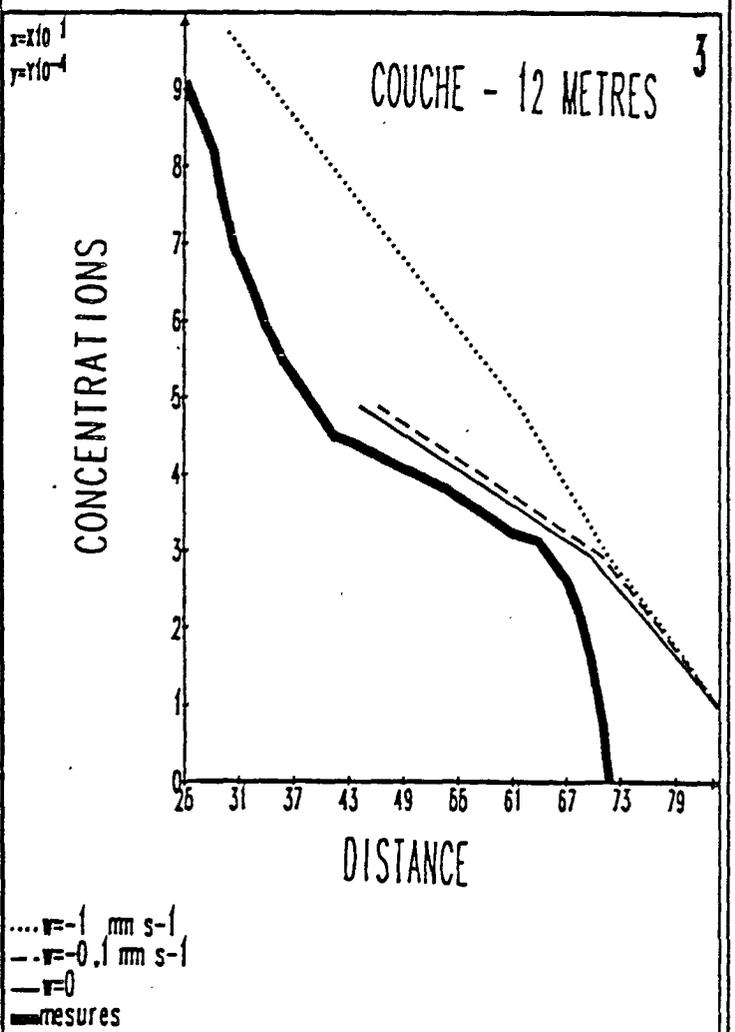
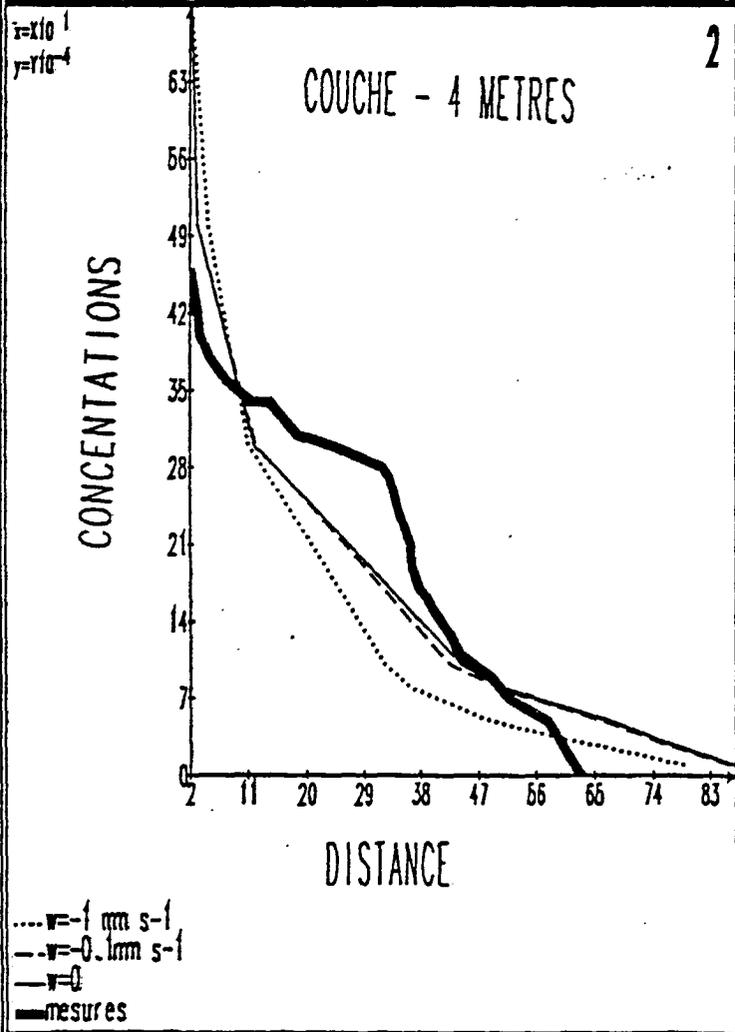
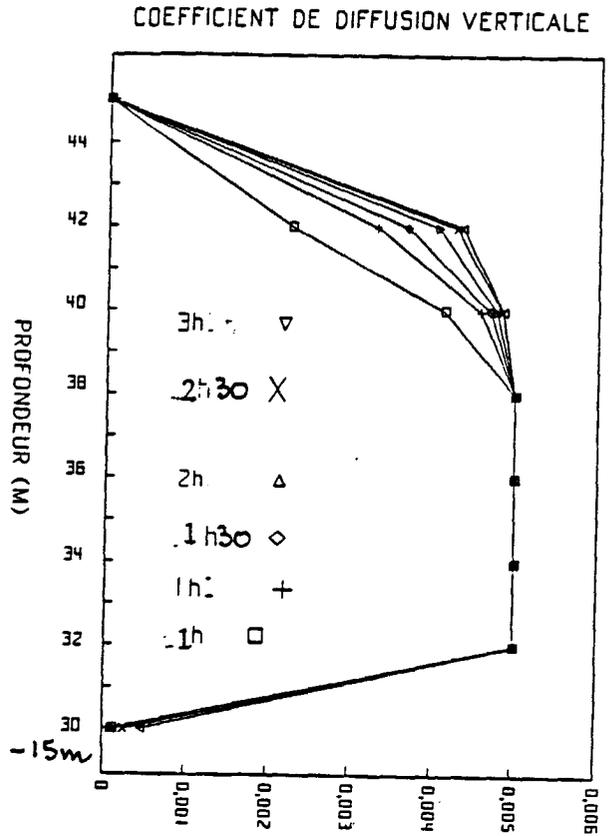
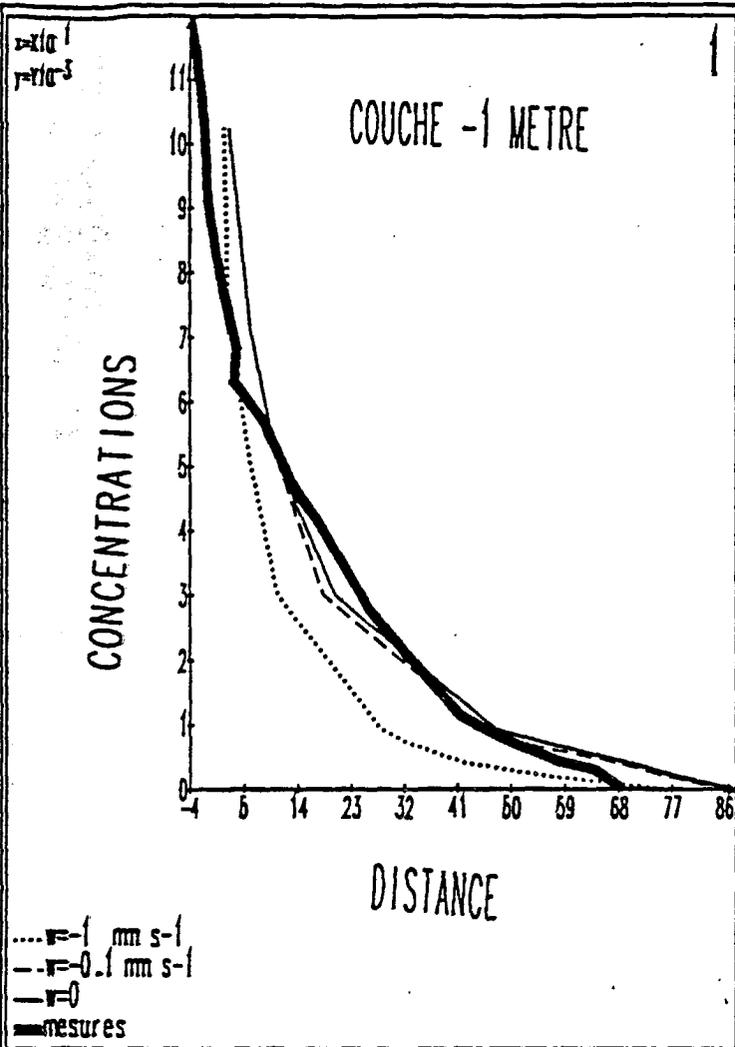


FIGURE C 4-5 : Essais avec 3 vitesses de chute



### c. Coefficients de diffusion verticale et vitesses de chute

Différentes combinaisons entre le coefficient de diffusion verticale et la vitesse de chute ont été testés. Le coefficient de diffusion verticale est caractérisé par les deux coefficients  $K_1$  et  $K_2$ ,  $K_2$  étant la valeur de  $K_z$  minimale et  $K_1$  la valeur maximale.

Les figures A4-6, A4-7 et A4-8 montrent les résultats dans les 3 couches à -1m, -4m et -12 mètres.

Deux courbes se distinguent des autres :

- l'une correspondant à une vitesse de chute nulle et un coefficient de diffusion verticale faible ( $K_1=0,001 \text{ m}^2/\text{s}$ )
- l'autre correspondant à une vitesse de chute forte (1mm/s) et le même coefficient de diffusion verticale faible

Ces deux choix ne donnent pas de résultats satisfaisants ; la première ne fait pas apparaître de particules à -12 mètres.

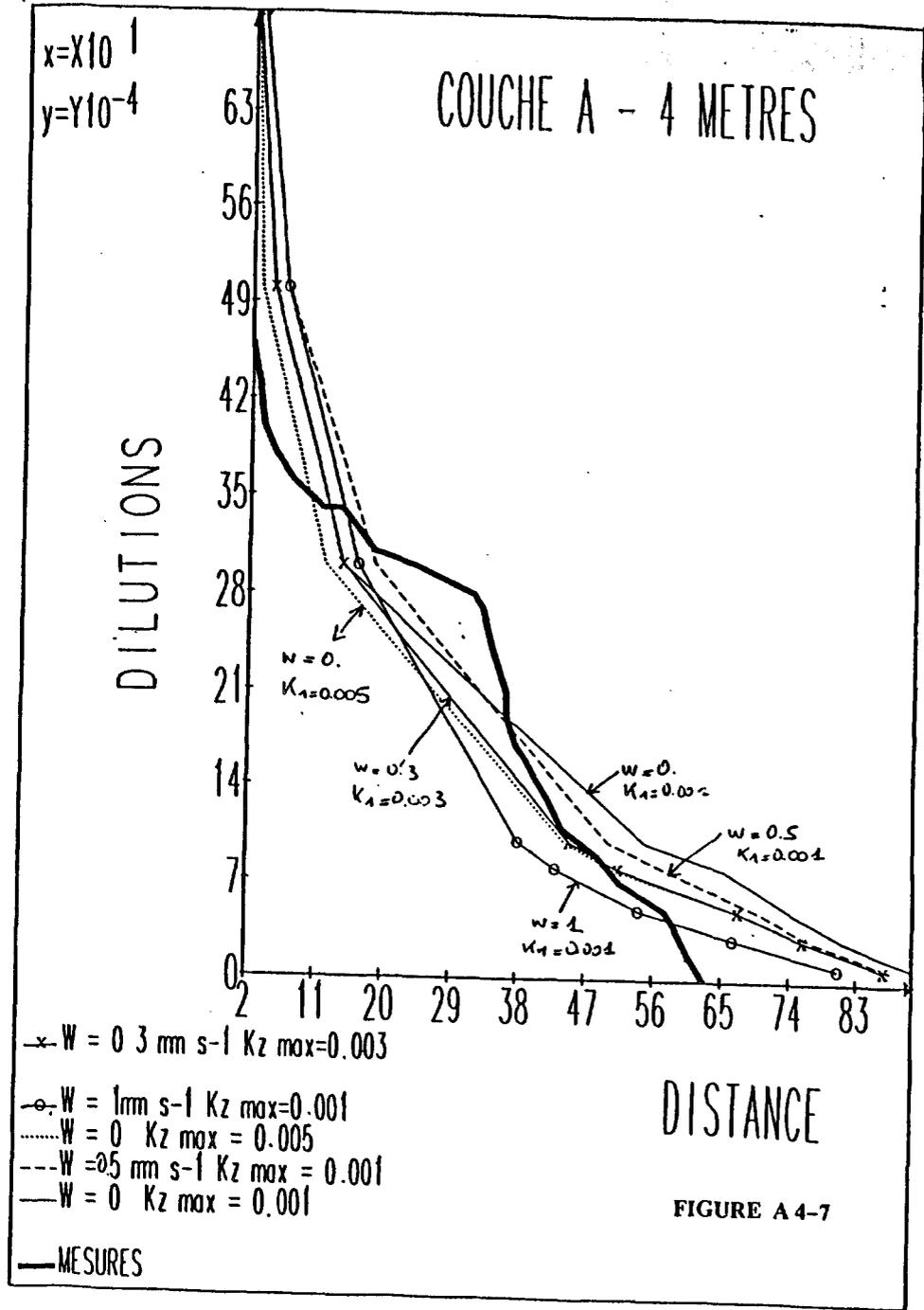
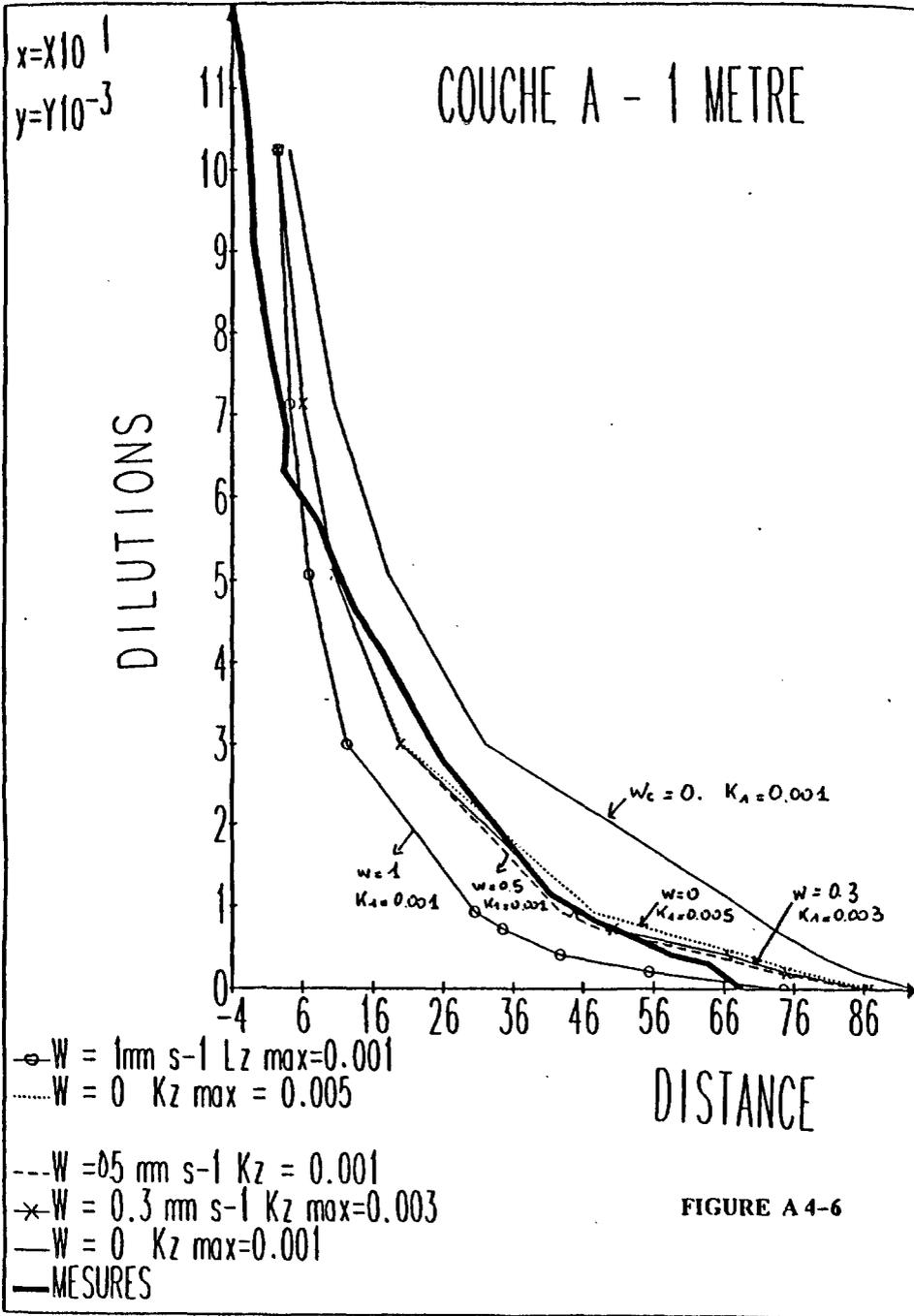
Les trois autres courbes correspondent :

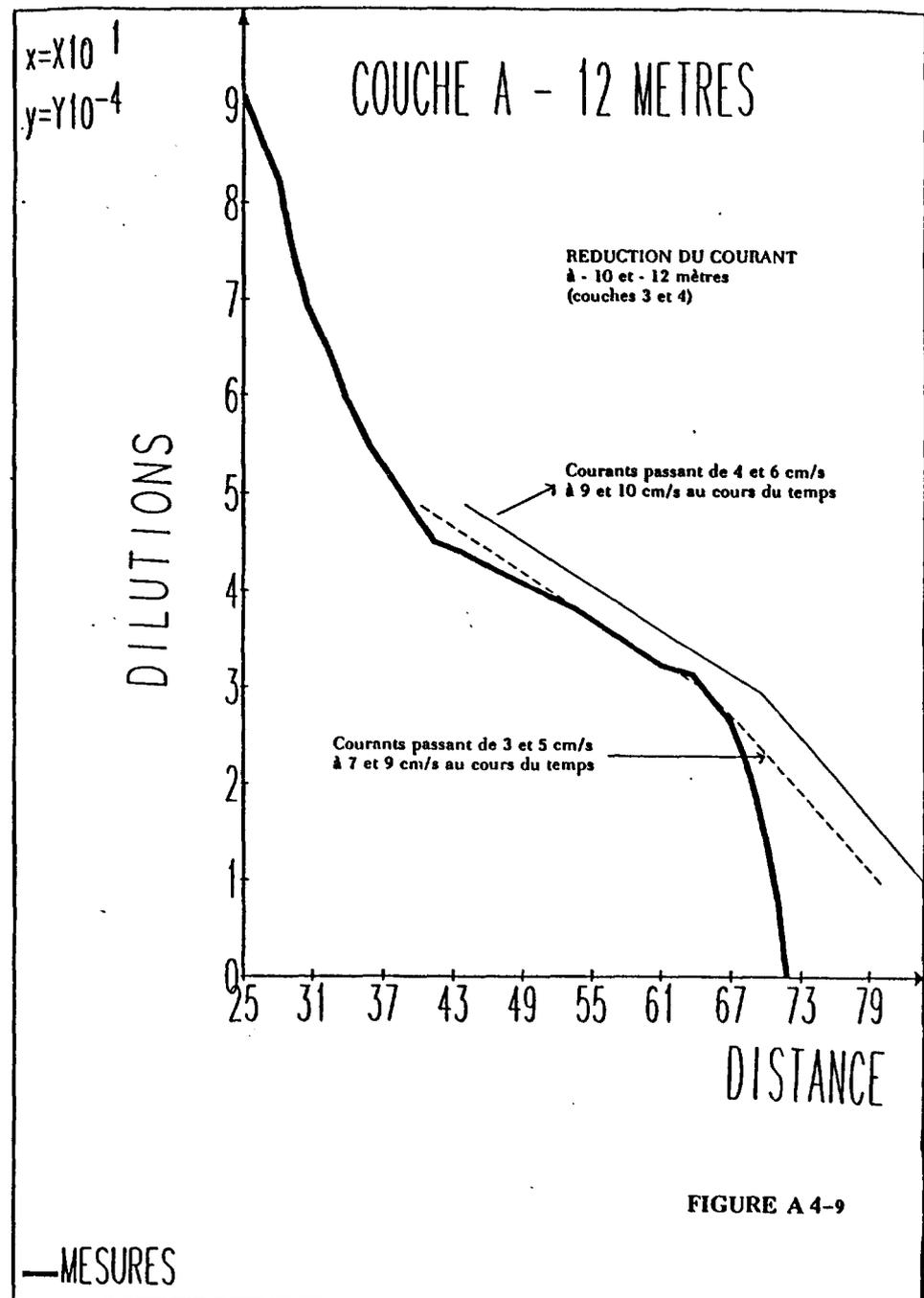
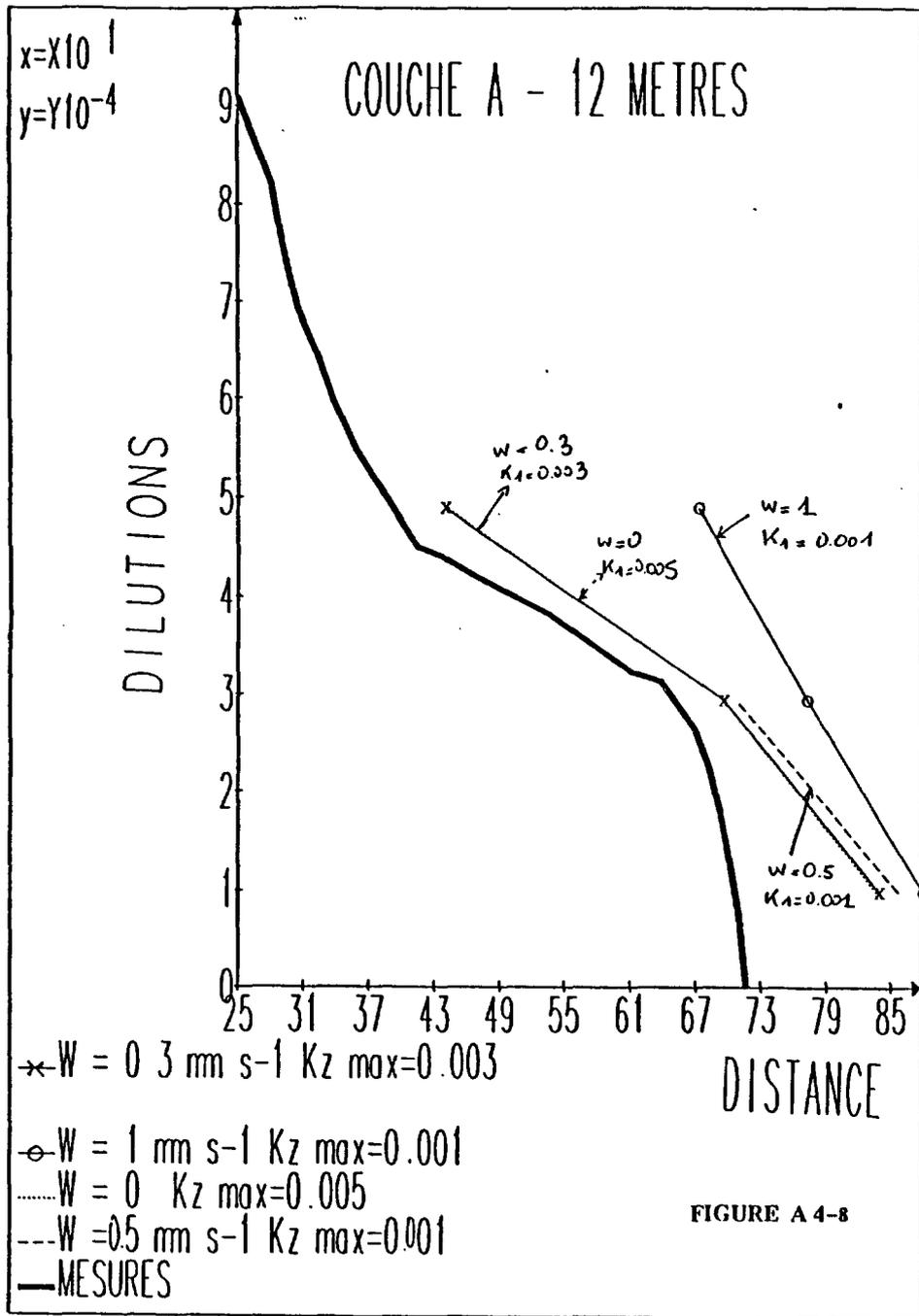
- soit à une vitesse de chute moyenne (0,3 à 0,5 mm/s) et un coefficient  $K_{z1}$  moyen (0,001 à 0,003)
- soit à une vitesse de chute nulle mais un coefficient de diffusion verticale fort (0,005).

Ces trois essais donnent des résultats semblables en surface. A - 12 mètres, on note l'apparition de particules vers 350 -400 mètres lorsque le coefficient de diffusion verticale est suffisamment fort ( $> 0,001$ ), et vers 600-700 mètres s'il est plus faible ( $=0,001$ ) malgré une vitesse de chute plus forte (0,5 mm/s).

Une valeur maximale de  $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$  du coefficient de diffusion verticale semble un peu forte. La simulation utilisant une vitesse de chute de 0,3 mm/s et un  $K_1$  égal à 0.003 semble donc plus proche de la réalité.

La réduction des courants dans les couches à -10 et -12 mètres sous la surface provoque un rapprochement du front de concentration de 40 à 60 mètre du panache et donc une meilleure adéquation aux mesures (figure A4-9).





### IV.2.1 Campagne C1 : 19 juin 1986

Les essais suivants concernent une campagne réalisée en milieu stratifié; le panache est bloqué à 15 mètres de profondeur. Le modèle de transport et mélange en couches reproduit les dilutions dans le nuage autour de l'émissaire, à différentes profondeurs.

Les courbes (C/C0 fonction de la distance) sont comparés aux mesures de dilution calculées pour le traceur radioactif (*figure A4-10*). La courbe en trait plein épais représente les mesures de dilution pour l'Or<sup>198</sup>. Les quatre autres courbes en trait fin décrivent l'évolution des dilutions calculées par le modèle au bout de 1 heure, 2 heures, 3 heures et 4 heures de simulation.

Le pic observé à -15 mètres vers 80-100 mètres de distance au rejet n'est pas reproduit. Son origine est difficile à préciser, peut-être est il dû à la courantologie locale due à la repoussée des eaux captées du panache qui s'étalent sur une faible épaisseur. Le modèle ne tient pas compte de ce type de phénomènes, puisque le courant est pris uniforme dans toute la zone.

Dans les différents exemples présentés ici, on a joué sur le coefficient de diffusion verticale  $K_{z1}$  et sur la vitesse de chute des particules du rejet  $w_c$ . La répartition des flux initiaux après la remontée du panache est la suivante :

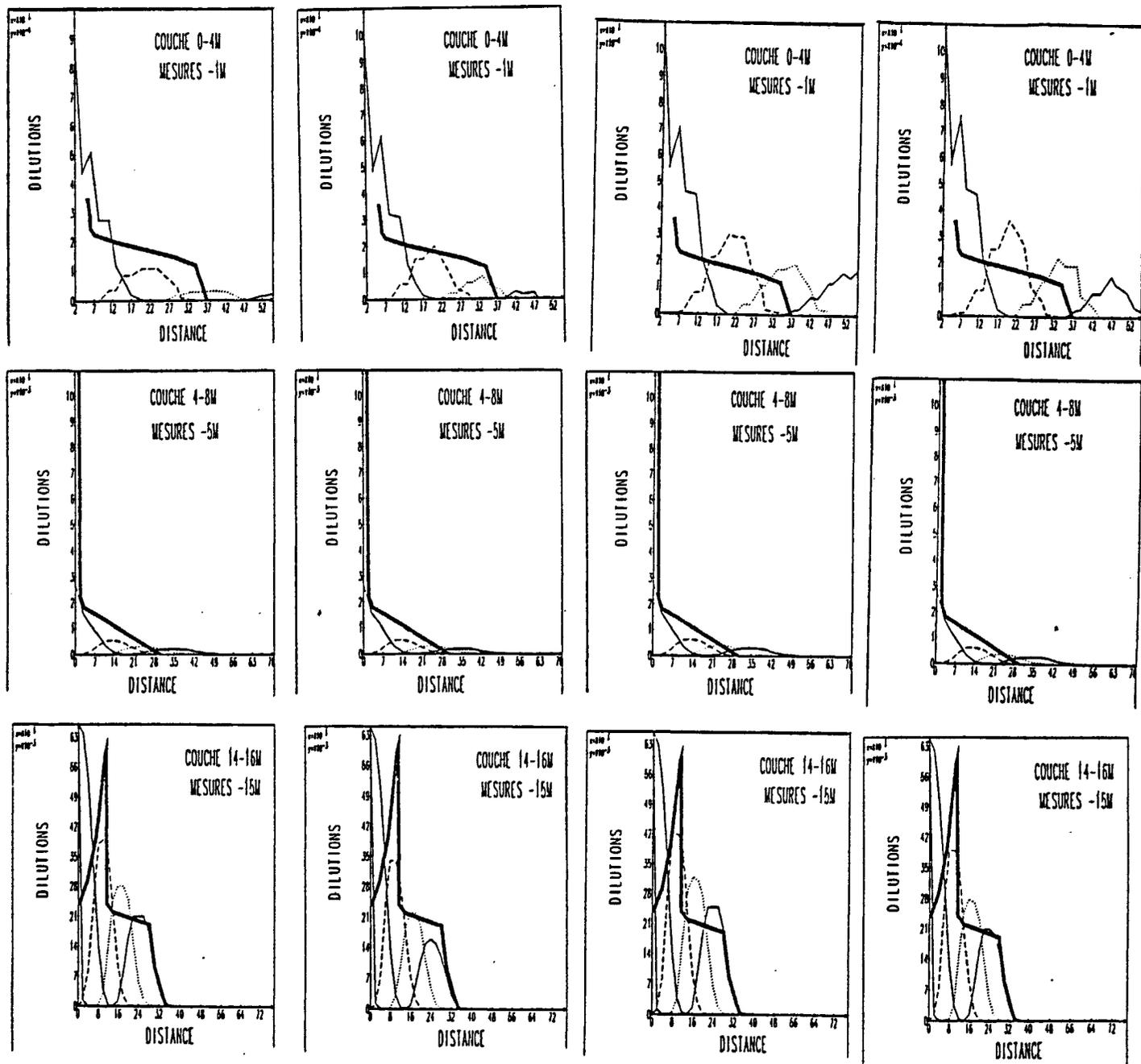
* couche 0-2 mètres	: 2,4%	====>	1,2% /mètre
* couche 2-8 mètres	: 12,0%	====>	2,0% /mètre
* couche 8-13 mètres	: 17,6%	====>	3,5% /mètre
* couche 13-16mètres	: 68,0%	====>	23,0% /mètre
* couches inférieures	: 00,0%	====>	0,0% /mètre

Au bout de quatre heures, on retrouve, dans les différentes couches et selon les différents cas de  $K_z$  et  $w_c$ , les stocks suivants (exprimés en % du total par mètre de profondeur) :

$K_{z1} (m^2/s)$	0,001	0,01	0,001	0,01
$w (mm/s)$	-0,3	-0,3	0	0
0-2m	0,04	0,5	1,25	1,7
2-8m	1,53	1,4	2	2,0
8-13m	0,93	1,2	3,8	4,6
13-16m	14,3	12,68	21,6	18,1
16-20m	8,27	6,93	0,37	1,6
20-24m	1,97	3,57	0,005	0,2
24-45m	0,11	0,23	0	0

Plus le coefficient  $K_z$  est fort, plus le pic de concentration est lissé sur la verticale, mais les différences sont surtout importantes lorsque la vitesse de chute varie.

Les profils verticaux de concentrations sont tracés pour ces quatre exemples en quelques points du domaine autour du panache (*figure A4-11*). Pour les points A et B, dans l'axe des courants qui entraînent la partie importante du nuage à -15 mètres de profondeur, le pic de concentrations s'est étalé vers le bas dans les deux cas de vitesse verticale non nulle. Pour les points C et D, dans la direction Nord-Ouest où portent les courants de surface, les concentrations sont plus importantes si la vitesse de chute est nulle.



$Kz1=0.001$   
 $wc=0.3$

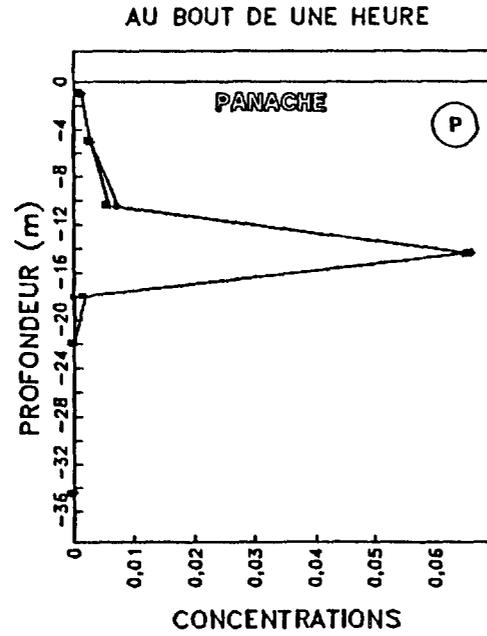
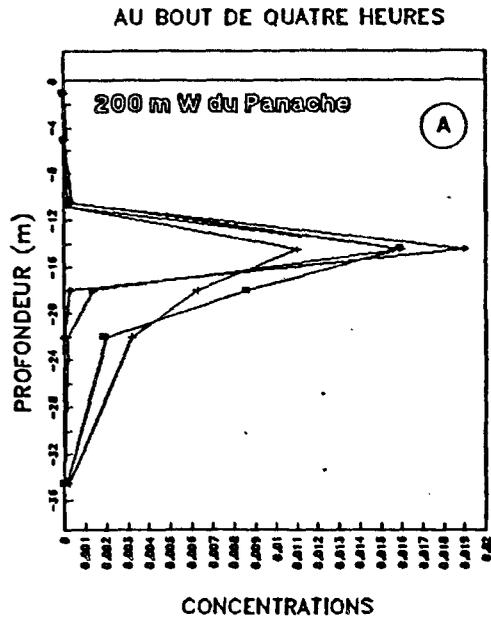
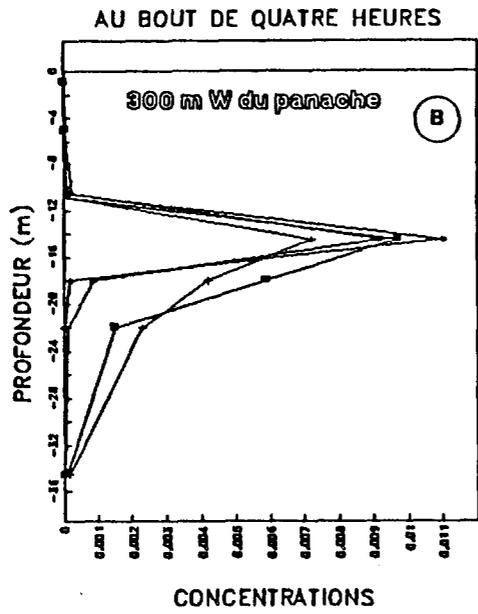
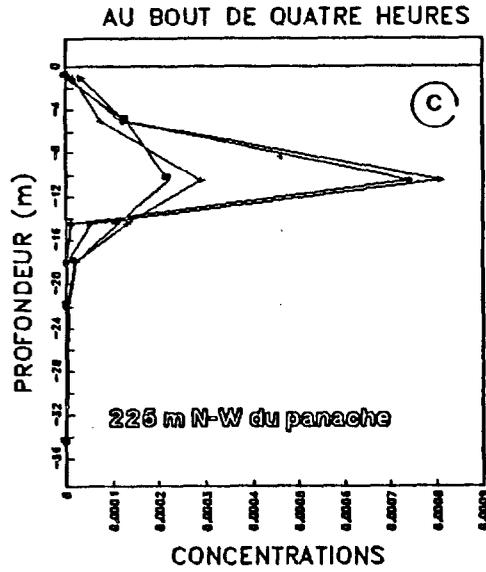
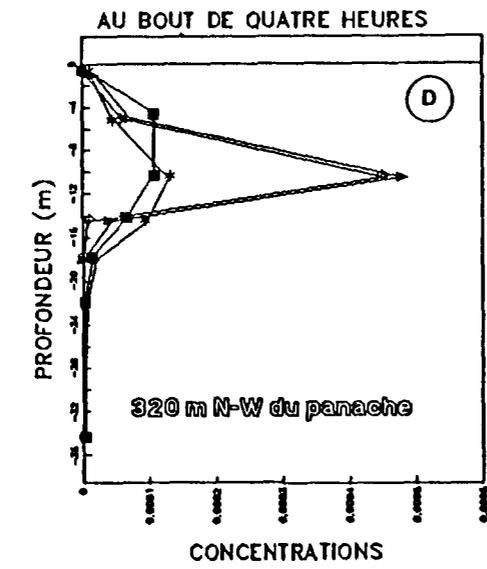
$Kz1=0.01$   
 $wc=0.3$

$Kz1=0.001$   
 $wc=0.$

$Kz1=0.01$   
 $wc=0.$

FIGURE A 4-10

- 1 heure
- - - 2 heures
- ..... 3 heures
- 4 heures



- $Kz1=0,001 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $Wc=-0,3 \text{ mm/s}$
- \*  $Kz1=0,01 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $Wc=-0,3 \text{ mm/s}$
- ◇  $Kz1=0,001 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $Wc=0$
- ▲  $Kz1=0,01 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $Wc=0$

Profils verticaux de concentrations pour différents couples de valeur ( $Kz$ ,  $Wc$ )

FIGURE A-411

<b>ANNEXE 5</b>
-----------------

**FICHES PRESENTANT LES DONNEES  
POUR L'APPLICATION DES MODELES AUX CAMPAGNES DE MESURES**

Les deux modèles ("JET" et transport et mélange) ont été appliqués aux campagnes de mesures (chapitre IV). Les données pour l'effluent et le milieu receveur sont résumées sur les fiches suivantes, chacune correspondante à une campagne.

**CAMPAGNES EN MILIEU HOMOGENE :**

- C6 du 29 Avril 1988
- C7 du 27 Avril 1988
- C2 du 16 Octobre 1988
- C4 du 19 Juin 1987

**CAMPAGNES EN MILIEU STRATIFIE :**

- C1 du 19 Juin 1986
- C5 du 8 Septembre 1987

Les fiches contiennent des informations sur :

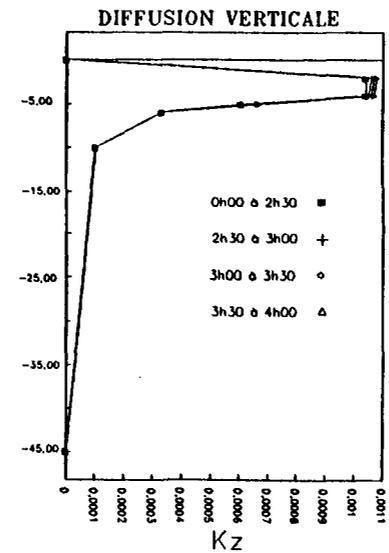
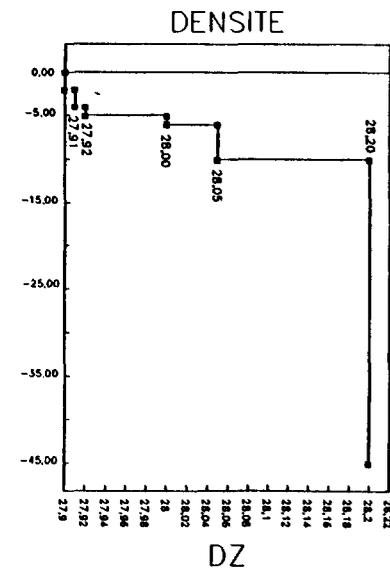
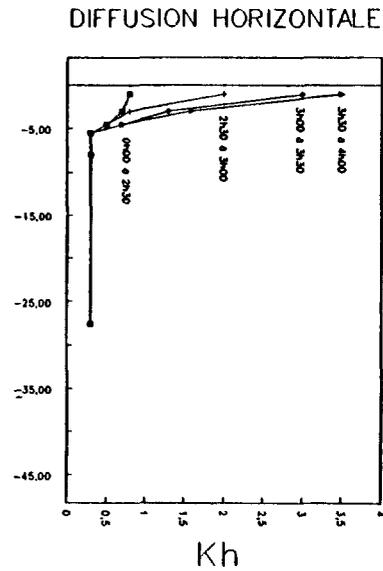
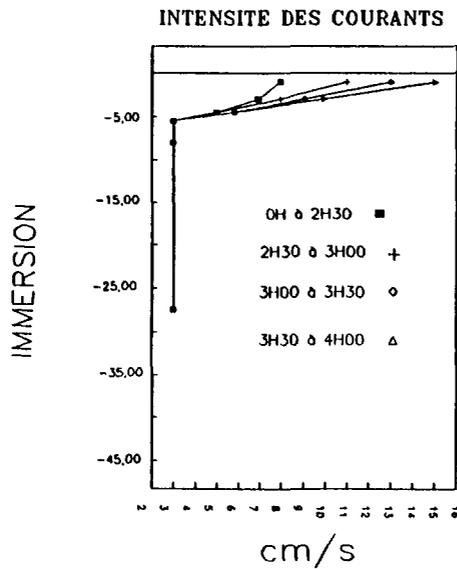
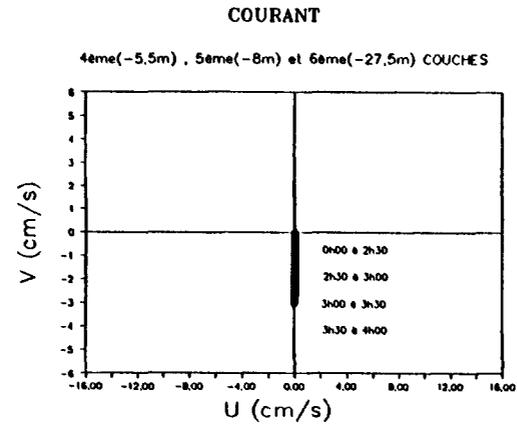
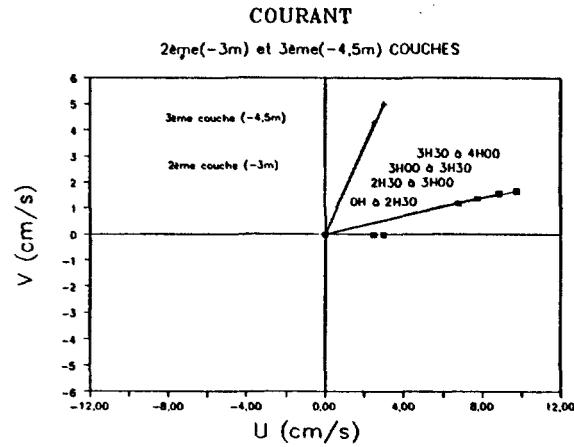
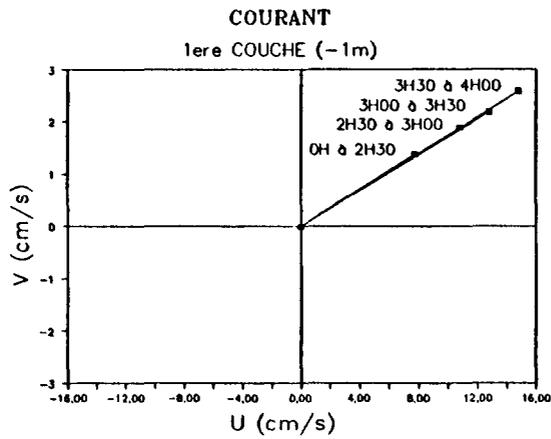
- le débit et la densité de l'effluent
- les courants horizontaux dans chaque couche
- les profils verticaux de courant et de densité
- les profils verticaux des coefficients de diffusion horizontale et verticale.

Le nombre et l'épaisseur des couches est visible par le profil en escalier de la densité.

Les courants et par conséquent les coefficients de diffusion dépendent du temps, c'est pourquoi on a plusieurs profils selon les instants.

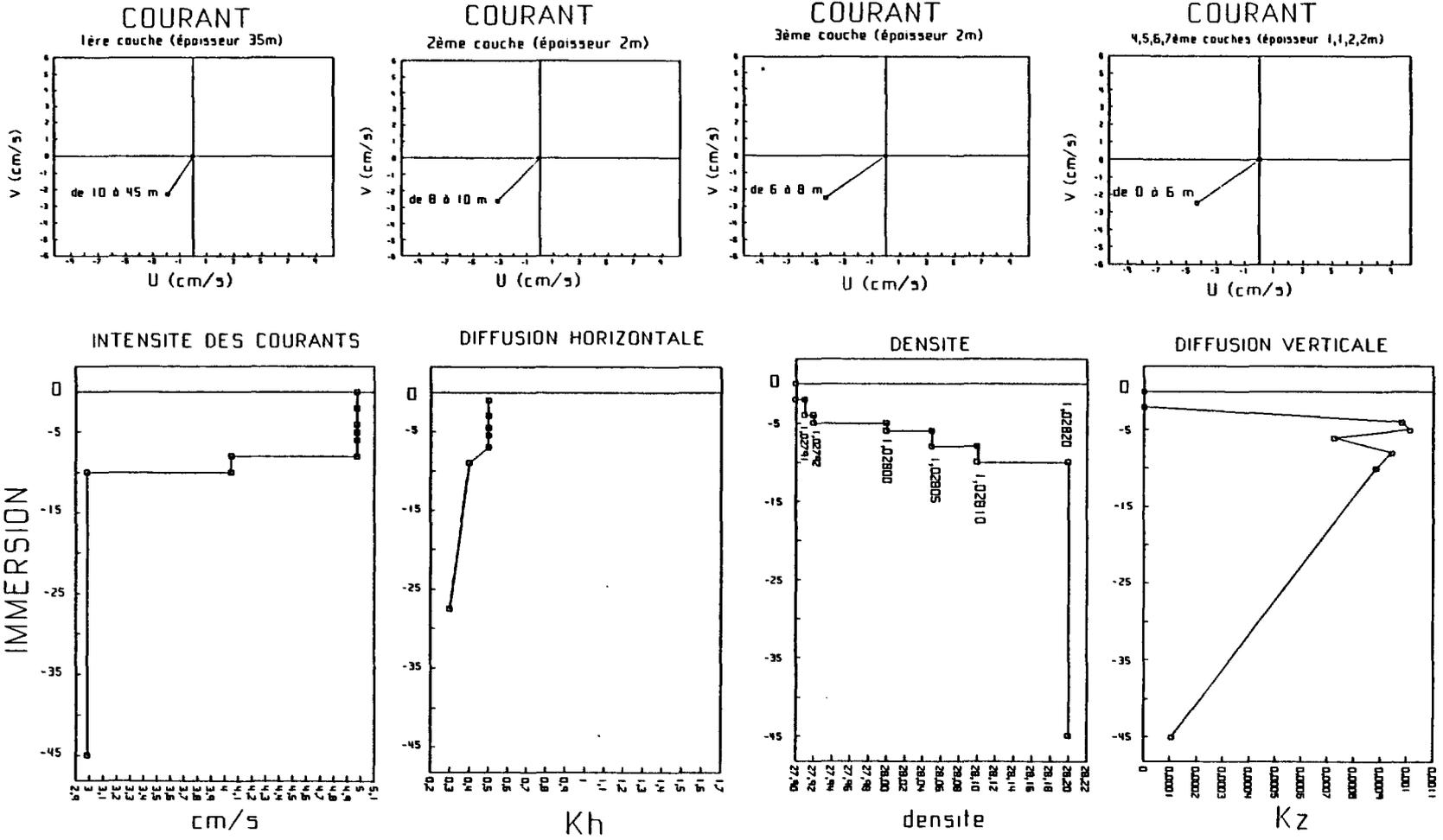
C6

**CAMPAGNE RHODAMINE DU 29 AVRIL 1988**  
 DEBIT=1116 m<sup>3</sup>/h - DENSITE=0,9991 -  
 Injection instantanée de Rhodamine

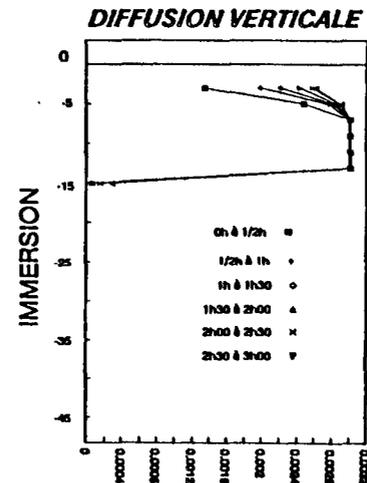
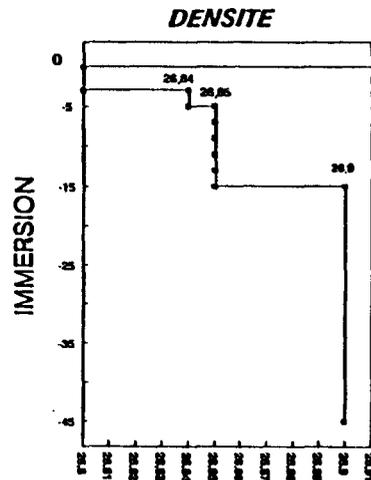
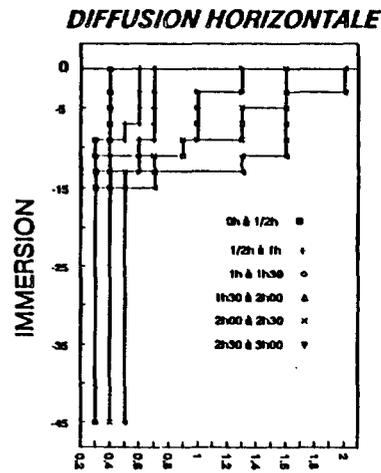
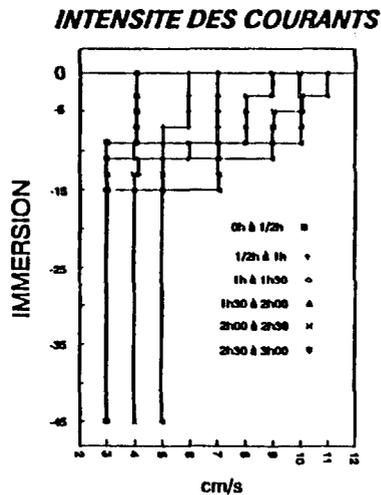
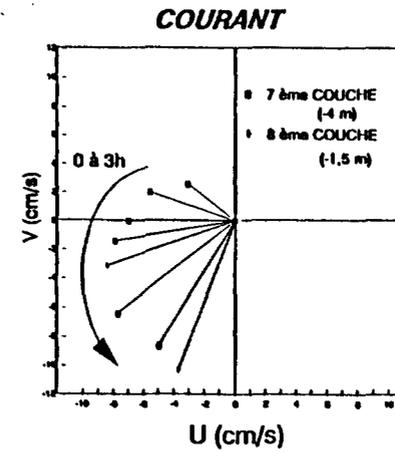
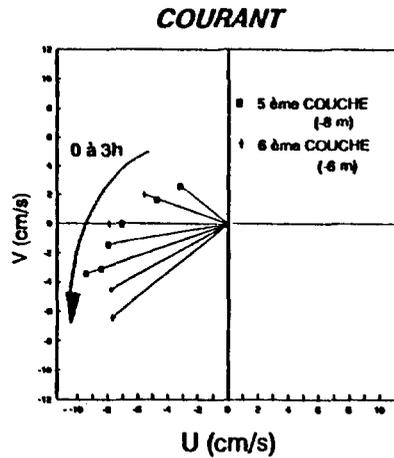
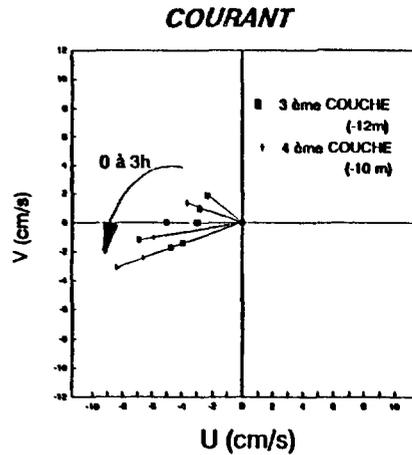
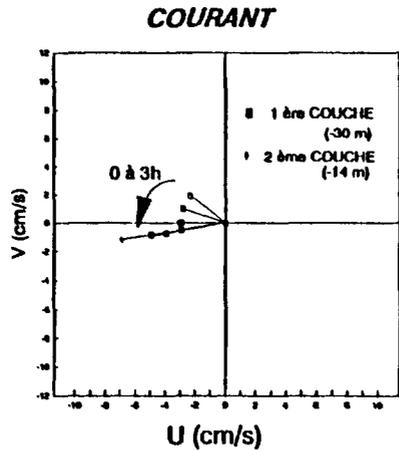


C7

**CAMPAGNE RHODAMINE DU 27 AVRIL 1988**  
 DEBIT EMISSAIRE=1008 m<sup>3</sup>/h    DENSITE EFFLUENT= 0.9991  
 INJECTION DE BOUES EN CONTINU

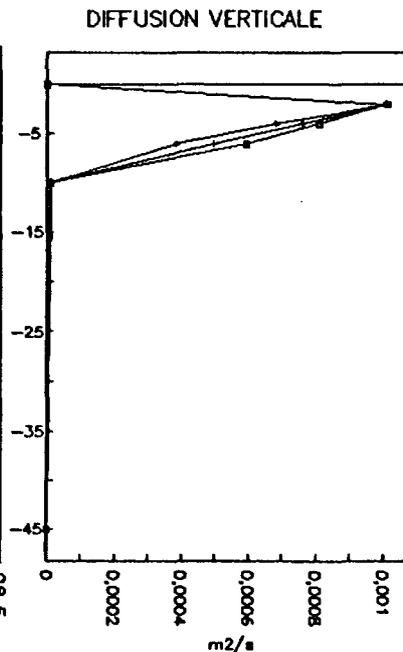
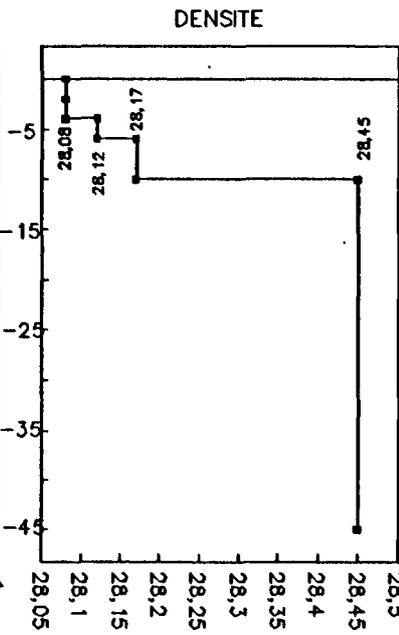
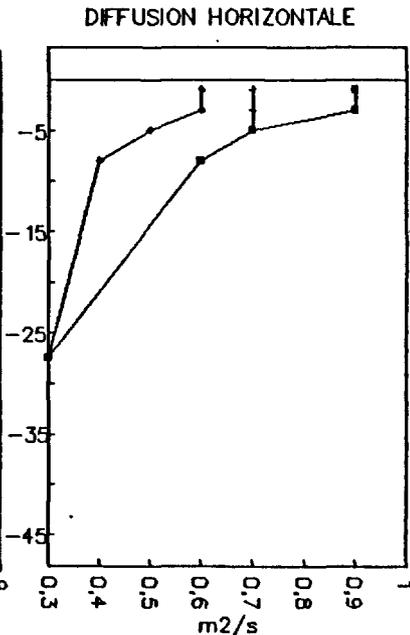
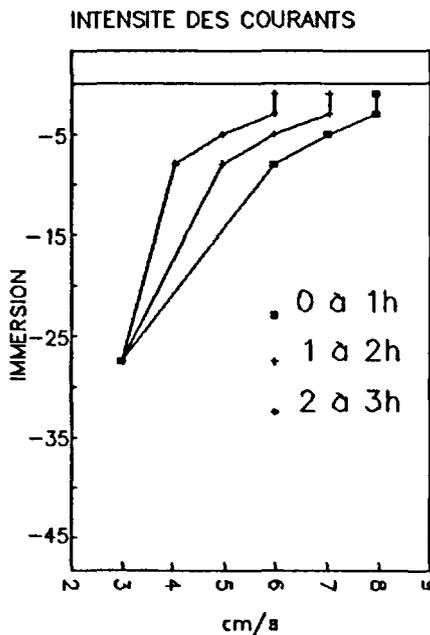
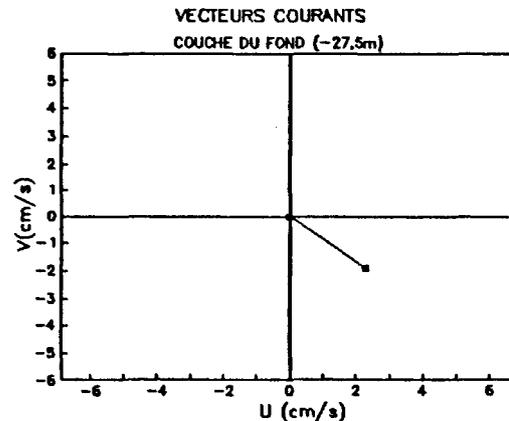
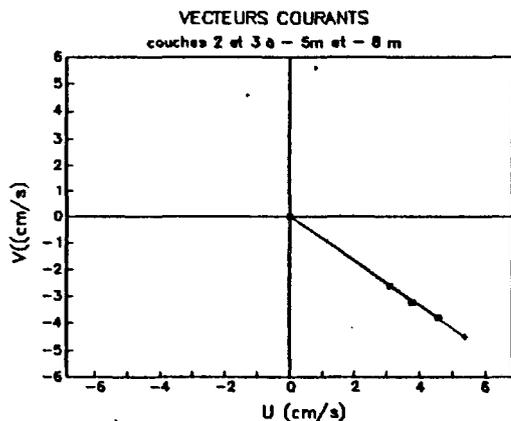
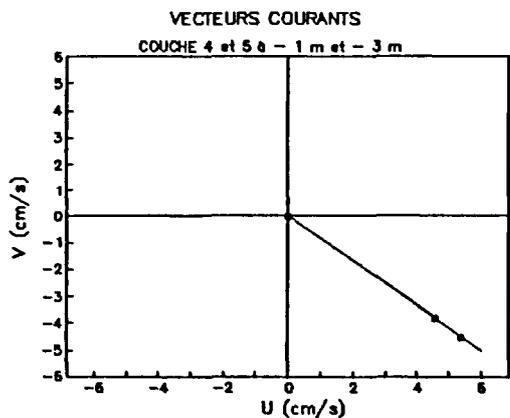


**CAMPAGNE C.E.A DU 16 OCTOBRE 1986**  
**DEBIT EMISSAIRE = 792 m<sup>3</sup>/h - DENSITE = 0,9971**  
**INJECTION CONTINUE DE TRACEUR RADIOACTIF (Or 198)**



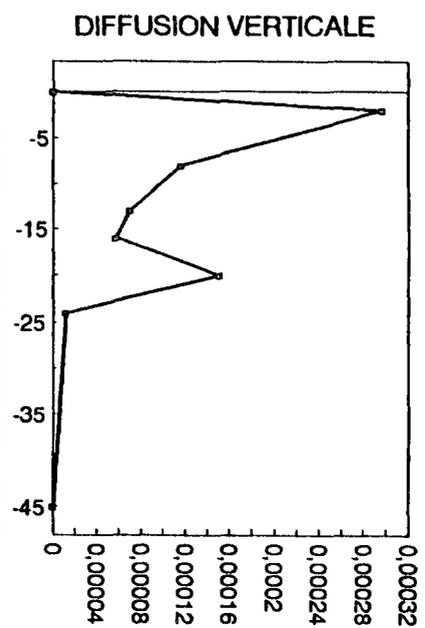
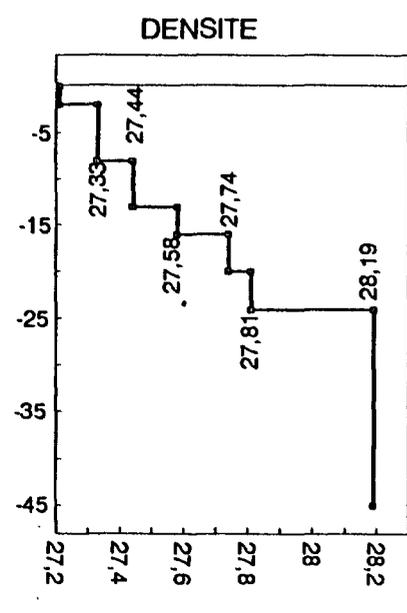
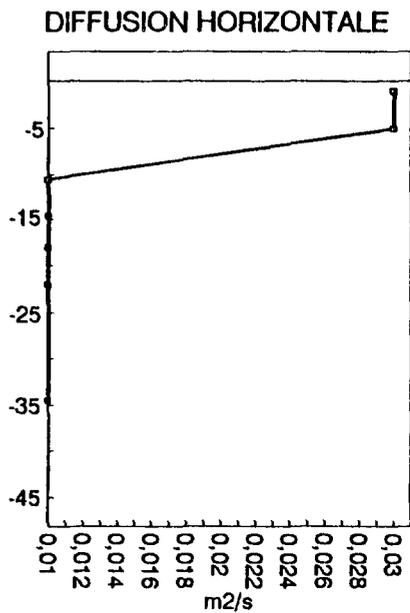
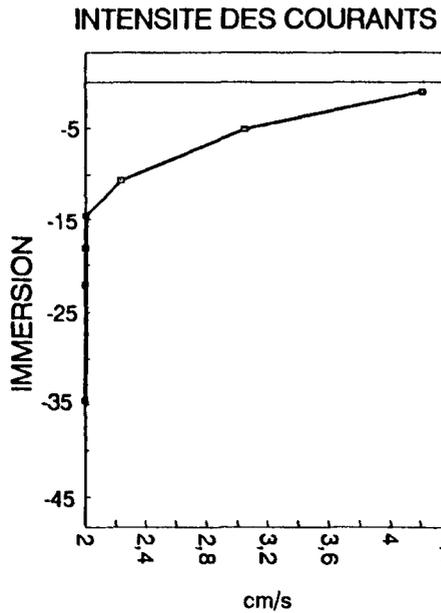
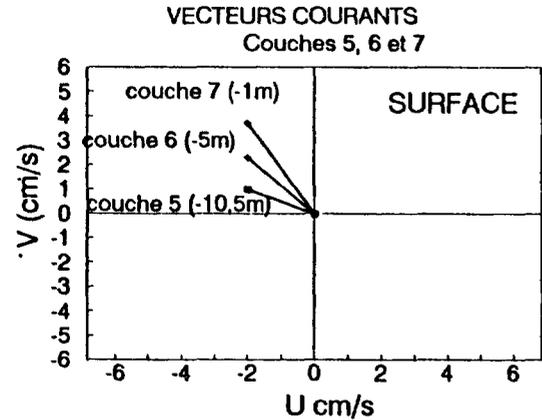
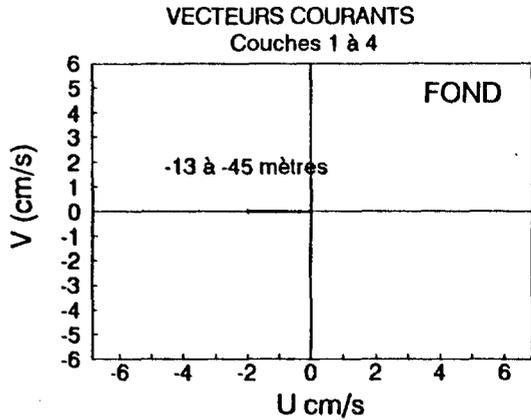
C4

CAMPAGNE TECHNETIUM DU 19 JUIN 1987  
 DEBIT+756 m<sup>3</sup>/h – DENSITE =0,997  
 Injection instantanée de Rhodamine et Technetium en surface



C1

**CAMPAGNE C.E.A. DU 19 JUIN 1986**  
 DEBIT= 432 m<sup>3</sup>/h - DENSITE= 0,9981  
 INJECTION CONTINUE DE TRACEUR RADIOACTIF (Au 198)



C5

**CAMPAGNE C.E.A. DU 8 SEPTEMBRE 1987**  
 DEBIT=684 m<sup>3</sup>/h - DENSITE=0,9981  
 INJECTION CONTINUE DE TRACEUR RADIOACTIF

