

Modélisation à méso-échelle de  
l'hydrodynamique et du transport de  
particules en milieu marin semi-ouvert.  
Application au Golfe du Lion. (Volume 2)

THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences  
de l'Université de Neuchâtel

pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences  
par

Vincent THUNUS

Ingénieur Civil Mécanicien (Mécanique Physique)  
diplômé de l'Université de Liège (B)

Soutenue le 30 janvier 1996 devant le Jury d'Examen composé de

Dr François Nyffeler, Université de Neuchâtel	Président
Dr Pierre Brasseur, Université J. Fourier, Grenoble	Examineur
Pr Miquel Canals, Universitat de Barcelona	Examineur
Pr Dieter Imboden, ETH Zürich	Examineur
Dr Claude Millot, COM/CNRS, La Seyne sur Mer	Examineur
Dr Eduard Zuur, Université de Neuchâtel	Examineur

**TRAVAUX DE L'INSTITUT DE GÉOLOGIE  
DE NEUCHÂTEL (Suisse)**

PUBLICATION No. 367

Modélisation à méso-échelle de  
l'hydrodynamique et du transport de  
particules en milieu marin semi-ouvert.  
Application au Golfe du Lion. (Volume 2)

THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences  
de l'Université de Neuchâtel

pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences  
par

Vincent THUNUS

Ingénieur Civil Mécanicien (Mécanique Physique)  
diplômé de l'Université de Liège (B)

Soutenue le 30 janvier 1996 devant le Jury d'Examen composé de

Dr François Nyffeler, Université de Neuchâtel	Président
Dr Pierre Brasseur, Université J. Fourier, Grenoble	Examineur
Pr Miquel Canals, Universitat de Barcelona	Examineur
Pr Dieter Imboden, ETH Zürich	Examineur
Dr Claude Millot, COM/CNRS, La Seyne sur Mer	Examineur
Dr Eduard Zuur, Université de Neuchâtel	Examineur

## Volume II

Collection des résultats des  
simulations dans le Golfe du  
Lion

# Table des matières

## II Collection des résultats des simulations dans le Golfe du Lion

<b>1</b>	<b>Introduction et modes de représentations des résultats</b>	<b>1</b>
1.1	Mode de représentation des champs de vitesse, température et salinité . . . . .	1
1.2	Mode de représentation des champs de pression de surface . . .	2
1.3	Mode de représentation des particules en suspension et dans le sédiment . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Résultats des simulations</b>	<b>4</b>
2.1	Circulation moyenne estivale (juillet) . . . . .	4
2.1.1	Simulation hydrodynamique . . . . .	4
2.1.2	Transport de particules . . . . .	9
2.2	Circulation (juillet) par vent du NO . . . . .	19
2.2.1	Simulation hydrodynamique . . . . .	19
2.2.2	Transport de particules . . . . .	29
2.3	Circulation (juillet) par vent variable . . . . .	38
2.3.1	Simulation hydrodynamique . . . . .	38
2.3.2	Oscillations d'inertie . . . . .	47
2.4	Circulation moyenne hivernale (février) . . . . .	52
2.4.1	Simulation hydrodynamique . . . . .	52
2.4.2	Transport de particules . . . . .	55
2.5	Simulation (février) par vent NO . . . . .	60
2.5.1	Simulation hydrodynamique . . . . .	60
2.5.2	Transport de particules . . . . .	66
2.6	Simulation (février) par vent du SE . . . . .	72
2.6.1	Simulation hydrodynamique . . . . .	72
2.6.2	Transport de particules . . . . .	77

# Chapitre 1

## Introduction et modes de représentations des résultats

Ce volume rassemble les figures résumant les résultats des simulations hydrodynamiques et du calcul du transport particulaire sur le Golfe du Lion.

Ces simulations ont été effectuées à l'aide d'un modèle de circulation générale, le PROSPER General Circulation Model (PGCM), développé à l'Université de Neuchâtel. Les détails concernant la mise en oeuvre du modèle et les développements qui y ont été apportés figurent dans le volume I (Thunus, V. (1996). *Modélisation à méso-échelle de l'hydrodynamique et du transport de particules en milieu marin semi-ouvert. Application au Golfe du Lion*. PhD thesis, Université de Neuchâtel.).

Afin de rencontrer la finalité de notre travail, à savoir la description et l'analyse des processus hydrodynamiques majeurs de la méso-échelle ainsi que la mesure de leur importance relative pour le transport des particules, l'exploitation du modèle a consisté en une série de simulations visant à mettre en évidence les caractéristiques de la circulation et du transport de particules sous des conditions de forçage typiques.

Les conditions initiales reposent sur les résultats d'un modèle variationnel inverse (GHER-VIM) utilisant des données climatologiques de température et salinité. Deux mois de référence, juillet et février, ont été considérés. Le tableau 1.1 résume les simulations effectuées.

### 1.1 Mode de représentation des champs de vitesse, température et salinité

Le mode de représentation des champs de vitesse, température et salinité consiste en des coupes horizontales et verticales instantanées superposant

mois	$T_h$	forçage par vent	$T_p$	champ d'advection des part.
juillet	0,5 j	nul	90 j	stationnaire
juillet	8 j	NO (4 j) puis nul	8 j	évolutif
juillet	6 j	variable	—	évolutif
février	0,5 j	nul	90 j	stationnaire
février	8 j	NO (4 j) puis nul	8 j	évolutif
février	8 j	SE (4 j) puis nul	8 j	évolutif

Tableau 1.1: Tableau synoptique des différentes simulations effectuées. Pour chacune d'elles on précise le mois de référence, la durée de la simulation hydrodynamique ( $T_h$ ), le type de forçage par le vent, la durée de la simulation de transport ( $T_p$ ) et le caractère stationnaire ou évolutif du champ de vitesse utilisé pour l'intégration des trajectoires des particules.

des vecteurs vitesses à une carte d'isothermes ou d'isohalines selon le champ scalaire représenté. Chaque figure réunit les différentes coupes relatives à un même instant. On identifie chacune des coupes à l'aide de l'indice  $I$ ,  $J$  ou  $K$  correspondant. Sur chacune des coupes, on mentionne la valeur de  $V_{max}$  qui correspond à la vitesse maximale obtenue dans la coupe considérée (pour les coupes verticales, la valeur maximale de la composante verticale est également mentionnée sous  $W_{max}$ ). Afin d'assurer la lisibilité des figures, le facteur d'échelle pour les vecteurs est ajusté chaque fois selon  $V_{max}$ . Pour les isothermes et isohalines, une échelle linéaire entre valeurs minimale et maximale relevées dans chaque coupe est utilisée. En raison de la grande disparité entre la résolution verticale des couches de surface et de fond, les coupes verticales visualisent soit la partie supérieure de la colonne d'eau (les 152 premiers mètres), soit sa partie inférieure (au-delà de 152m et jusqu'au fond). Le rapport d'aspect entre dimensions horizontale et verticale varie donc selon le cas. Afin de localiser aisément les coupes verticales, celles-ci sont repérées, pour chaque simulation, sur une vue tridimensionnelle de la bathymétrie. Enfin, on note que les vecteurs vitesses sont tracés un point de maillage sur deux.

## 1.2 Mode de représentation des champs de pression de surface

On visualise les champs de pression de surface à l'aide de vues en perspective de l'élévation. Des valeurs minimales et maximales sont définies par rapport à une valeur moyenne fixée à zéro et l'échelle verticale de la perspective est

ajustée selon ces valeurs.

### 1.3 Mode de représentation des particules en suspension et dans le sédiment

Pour les particules, une même présentation des résultats est utilisée de manière systématique. Chacune des figures illustre les résultats d'un cas différent, caractérisé par la localisation du point source et la vitesse de chute. Elle se compose, pour les particules en suspension et dans le sédiment, de cartes visualisant leur distribution projetée sur un plan horizontal et de diagrammes montrant la distribution verticale, intégrée horizontalement et rapportée à l'unité de profondeur, de leur nombre. Dans chaque figure, il est fait mention de l'instant considéré, de l'état des particules ("SUS." ou "SED."), de leur nombre (rapporté au nombre total de particules relâchées jusqu'alors <sup>1</sup>), de la localisation du point source (visualisée par un rectangle dans les vues horizontales et par une croix dans les échelles verticales), de la profondeur moyenne correspondante et enfin de la vitesse de chute des particules. On sera attentif au fait que les échelles des diagrammes sont chaque fois ajustées selon les profondeurs minimales et maximales et selon le nombre maximum de particules, en suspension ou dans le sédiment. On gardera aussi à l'esprit que les mouvements verticaux que permettent de décrire ces diagrammes doivent être interprétés en terme de comportement global des particules. Afin de pouvoir distinguer les différentes représentations graphiques d'une même figure, les références aux figures seront éventuellement suffixées du nombre de jours de l'instant considéré et d'une lettre, h, v ou b, identifiant respectivement une distribution horizontale de particules en suspension, une distribution verticale ou une distribution de particules sur le fond, c.-à-d. dans le sédiment. Ainsi, par exemple, la figure 999/60v désigne la distribution verticale des particules à l'instant  $t = 60j$  dans la figure 999. Pour distinguer cette même distribution verticale à l'intérieur de la figure 999, on utilisera simplement 60v.

---

<sup>1</sup>Les particules qui quittent le domaine sans s'y être déposées ne sont pas comptabilisées.

## Chapitre 2

# Résultats des simulations

### 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

#### 2.1.1 Simulation hydrodynamique

Pour cette première simulation, le modèle calcule l'évolution des champs de vitesse, température et salinité, en l'absence de vent, sur 12 heures de temps réel, soit 480 pas de temps de 90s. Les conditions initiales correspondent aux données climatologiques <sup>1</sup> du mois de juillet.

Plusieurs coupes horizontales et verticales des champs de vitesse, température et salinité ont été tirées des résultats et sont présentées dans la figure 2.2. La figure 2.3 montre le champ de pression de surface.

---

Figure 2.1: Localisation des coupes verticales.

---

Figure 2.2: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse, température et salinité. Les coupes horizontales permettent de visualiser le courant ainsi que le champ de température à différentes profondeurs. En surface ( $K = 1$ ), la température varie entre  $19,5^{\circ}C$  et  $23^{\circ}C$  environ. Les eaux les plus chaudes se trouvent dans la partie NE du golfe tandis que les eaux plus froides sont localisées à sa limite SO. On note la présence de deux structures hydrodynamiques majeures: le courant LP qui s'écoule dans un mouvement vers le SO et un tourbillon anticyclonique sur la partie occidentale du golfe. La vitesse atteint la valeur maximale de  $21,72cm/s$ . Le rejet des eaux douces du Rhône provoque la formation d'une plume d'eau moins salée s'étendant sur plusieurs dizaines de  $km$ . Un peu plus en profondeur ( $K = 4$ ), le champ de vitesse est sensiblement identique alors que le champ de température pré-

---

<sup>1</sup>Les "données climatologiques" font référence aux résultats du modèle inverse.

## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

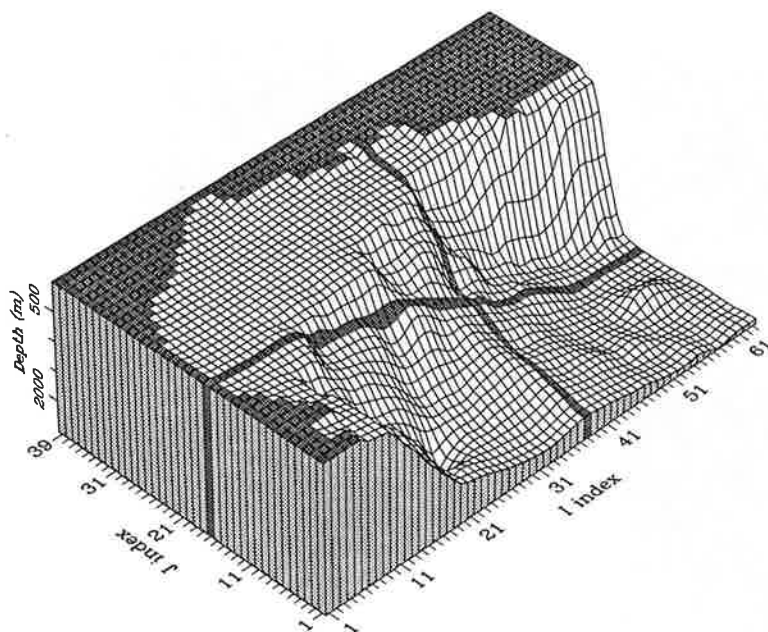


Figure 2.1

sente une distribution différente, même si le maximum de température reste localisé en entrée du courant LP. On note la présence d'un maximum local au centre du tourbillon. A 164m de profondeur et au-delà ( $K = 14$  et  $K = 29$ ), le courant LP, dont l'intensité diminue, s'écoule le long de la pente continentale tout en continuant à décrire des méandres. Les variations de températures sont moindres. A 2000m ( $K = 37$ ), le courant s'oriente vers l'est, alimenté par des flux d'eau descendants. Les coupes verticales O-E (en  $J = 17$ ) et S-N (en  $I = 38$ ) montrent les mouvements verticaux du fluide et les stratifications thermique et haline de la colonne d'eau. La stratification d'un mois d'été est bien apparente dans la coupe  $J = 17$  (de 0 à 152m). La couche de surface n'étant pas mélangée, la décroissance en température est relativement régulière, entre des valeurs de l'ordre de  $21^{\circ}C$  en surface et  $14^{\circ}C$  vers les 50m. On note toutefois, comme on l'observe également dans les coupes horizontales, que le champ de température n'est pas horizontalement homogène: la profondeur de l'isotherme  $14,4^{\circ}C$  par exemple varie entre 40m et 60m environ. Les mouvements verticaux du fluide sont associés aux variations d'intensité du champ de vitesse horizontale. On relève par exemple qu'aux variations observées dans les coupes  $K = 4$  ou  $K = 14$  de part et d'autre d'une ligne  $I = 50$  correspond un mouvement ascendant du fluide. Sur la coupe S-N  $I = 38$  on retrouve ce mouvement ascendant du courant qui s'étend sur presque toute la colonne d'eau.

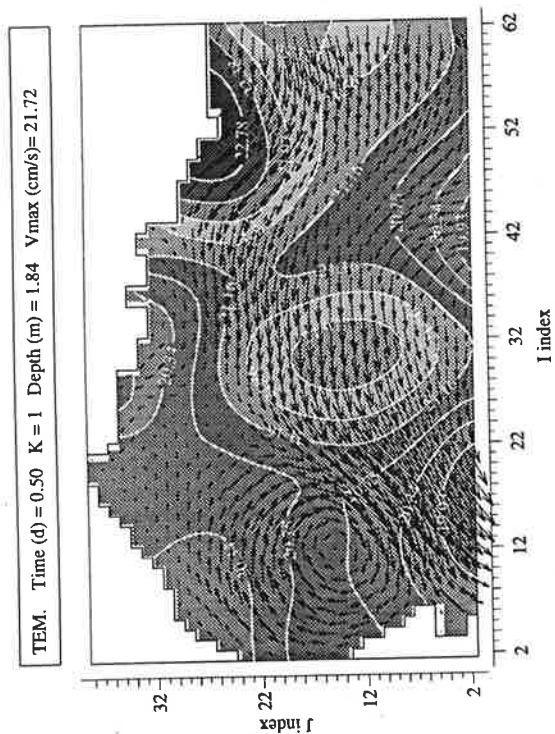
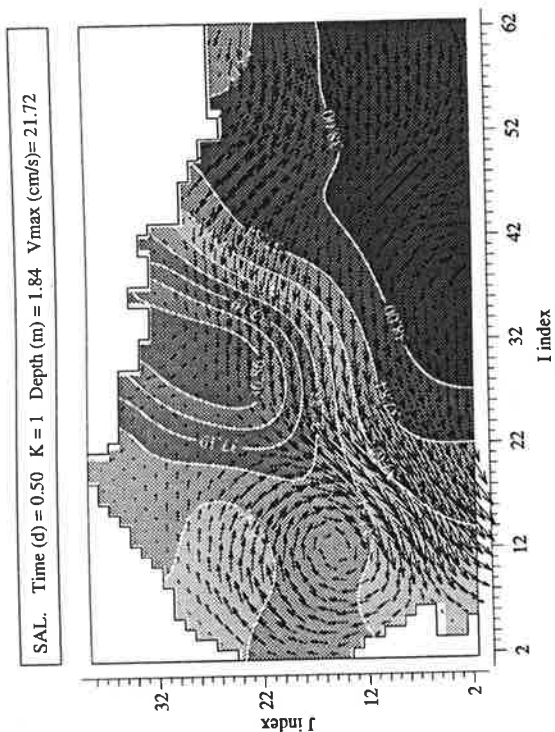
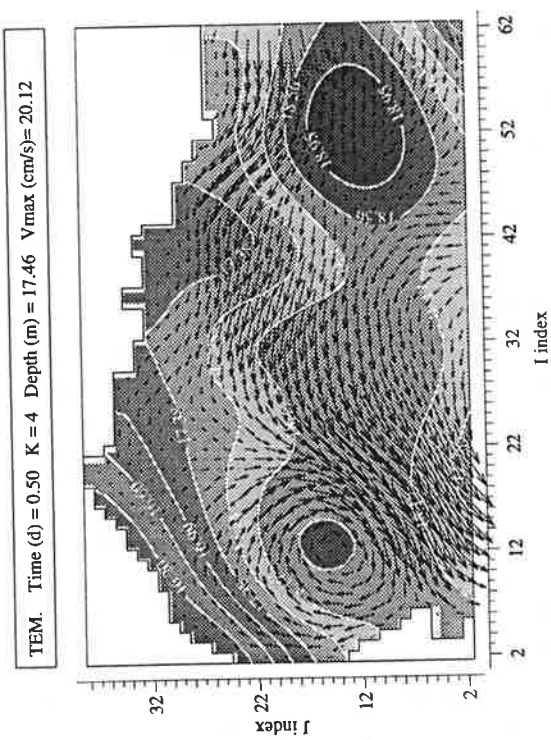


Figure 2.2: début



## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

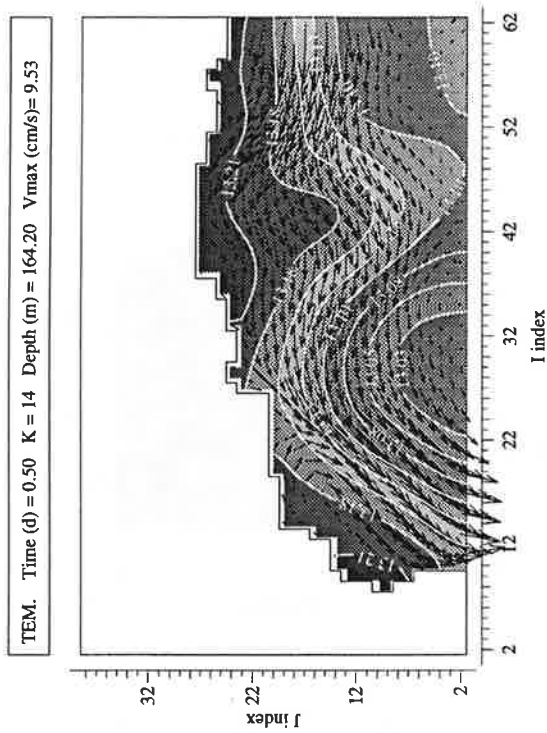
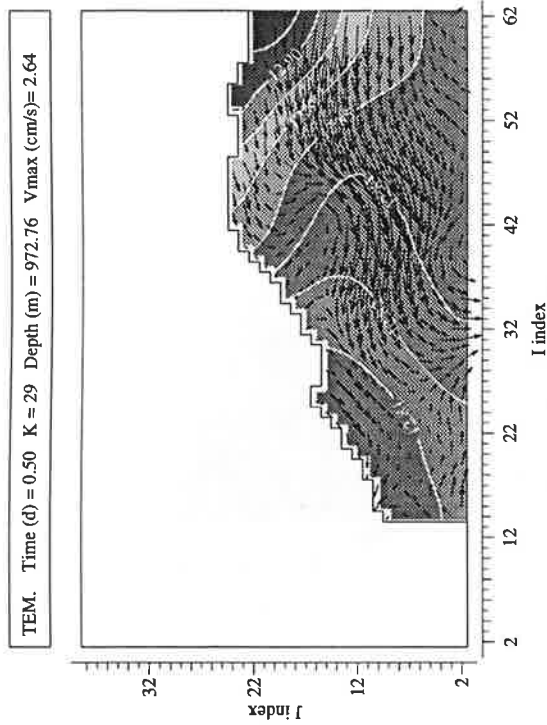
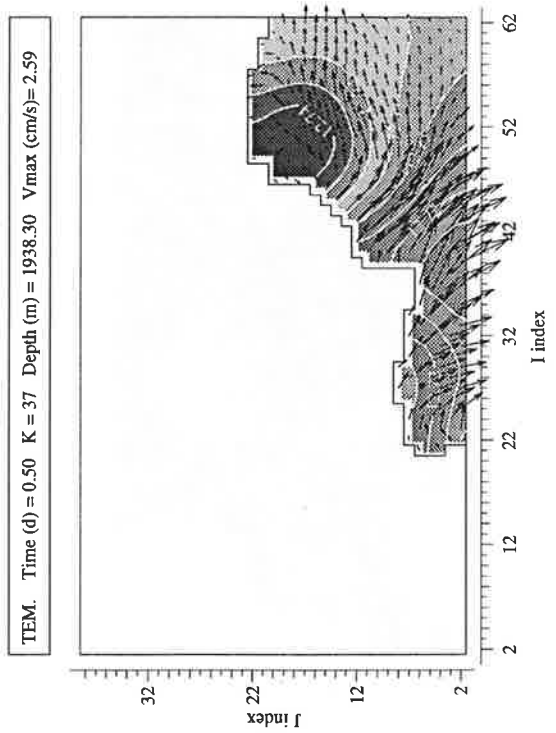


Figure 2.2: suite



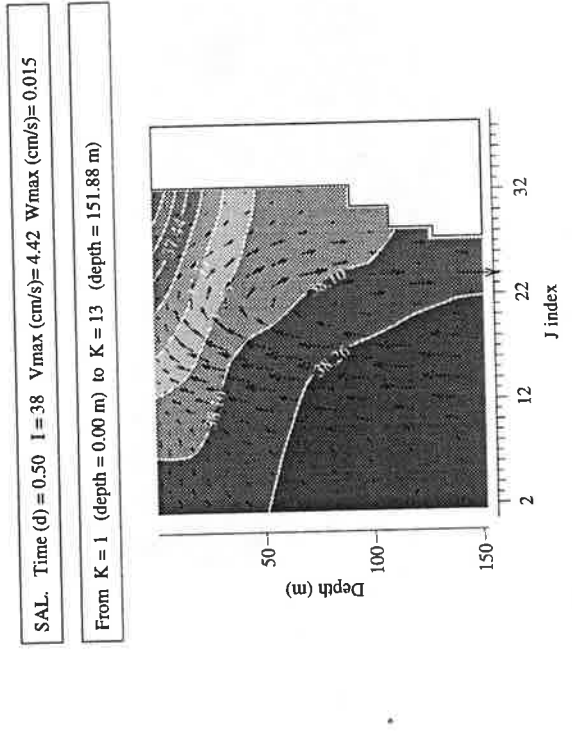
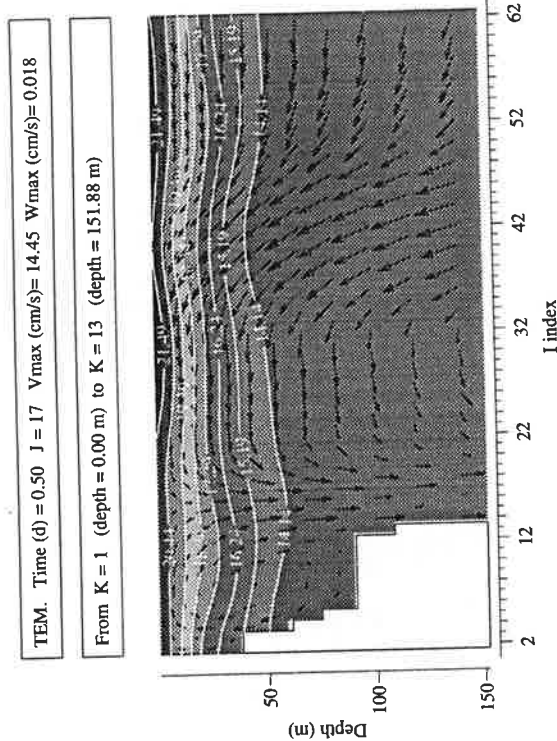
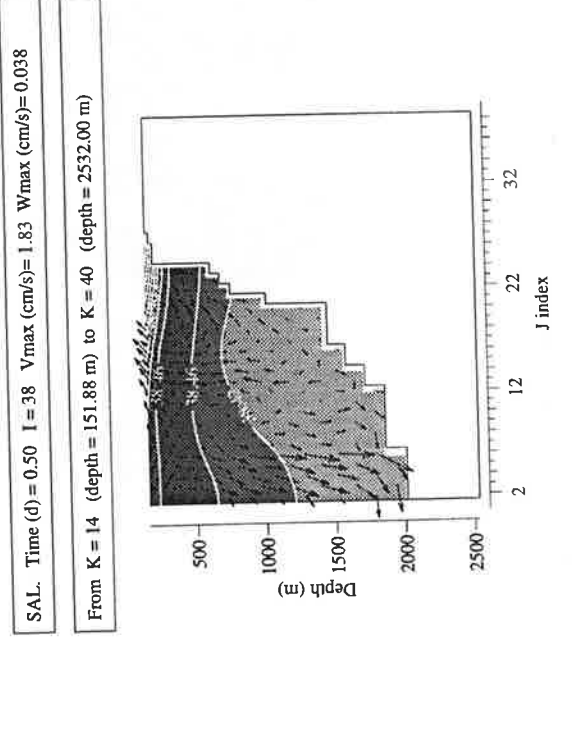
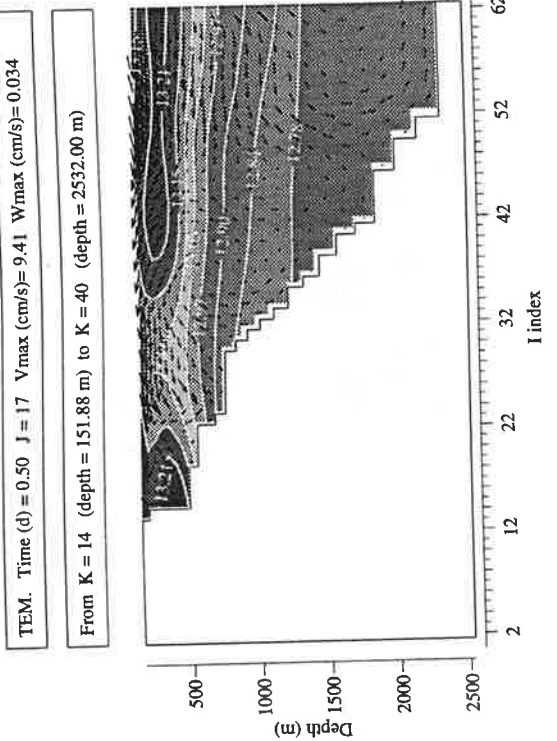


Figure 2.2: fin

## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

---

SURF. PRESSURE Time (d.hh) = 0.12 Zmin (cm) = -6.19 Zmax (cm) = 4.53

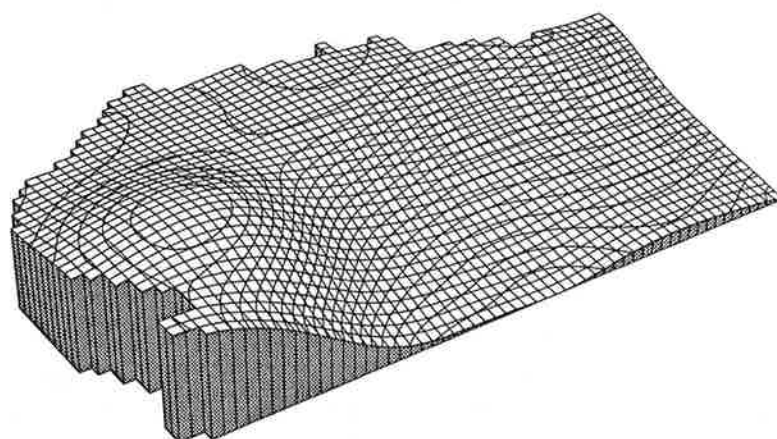


Figure 2.3

---

Figure 2.3: Champ de pression de surface. Une structure en dôme est associée au tourbillon anticyclonique du plateau continental tandis que le mouvement cyclonique du courant LP provoque une dépression. La différence d'élévation entre minimum et maximum est d'environ 11cm.

### 2.1.2 Transport de particules

Les trajectoires de particules depuis plusieurs points sources dans le Golfe du Lion ont été calculées pour une période de 90 jours sur la base du champ de vitesse obtenu ci-dessus.

Six cas d'étude combinant trois points sources et, pour chacun d'eux, deux vitesses de chute ont été retenus. Le tableau 2.1 précise pour chacun d'eux la localisation du point source, la valeur de la vitesse de chute ainsi que, dérivées de celle-ci, la variation de profondeur sur une période de 10 jours pour des particules entraînées (verticalement) par leur seule vitesse de chute, et la densité verticale correspondante.

Les figures 2.4 à 2.9 présentent les résultats du calcul de transport pour les cas A à F. La succession des différentes distributions après 30j, 60j et 90j permettent de suivre l'évolution des particules.

cas	$(I, J, K)_{src}$	débit	vit. de chute	$\Delta h/10j$	dens. $d_0$	figure
A	(35, 28, 1)	$100 j^{-1}$	0,04 m/h	9,6 m	$104,2 m^{-1}$	2.4
B	(35, 28, 1)	$100 j^{-1}$	0,16 m/h	38,4 m	$26,0 m^{-1}$	2.5
C	(6, 14, 1)	$100 j^{-1}$	0,08 m/h	19,2 m	$52,1 m^{-1}$	2.6
D	(6, 14, 1)	$100 j^{-1}$	0,16 m/h	38,4 m	$26,0 m^{-1}$	2.7
E	(61, 18, 1)	$100 j^{-1}$	0,06 m/h	14,4 m	$69,4 m^{-1}$	2.8
F	(61, 18, 1)	$100 j^{-1}$	0,00 m/h	0 m	$\infty m^{-1}$	2.9

Tableau 2.1: Tableau synoptique des différents paramètres pour le calcul du transport des particules. Pour chacun des six cas considérés, on précise la localisation du point source dans le domaine maillé, le débit de particules au point source, la vitesse de chute des particules, la variation de profondeur sur une période de 10 jours pour des particules sans mouvement vertical d'advection et la densité verticale correspondante (en nombre de particules par unité de profondeur de la colonne d'eau), notée  $d_0$ .

Figure 2.4: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas A. Pour la description du type des graphiques, on se référera à la section 1.3. Dans ce cas A, des particules à la vitesse de chute de  $0,04m/h$  sont relâchées en surface à quelques km de l'embouchure du Rhône, avec un débit constant de 100 particules par jour. Après 30 jours, 3000 particules sont en suspension dans la colonne d'eau (30h). Elles sont entraînées vers l'ouest sur le plateau continental par une branche du courant LP. Leur progression, au rythme de  $2km$  par jour, est relativement lente. L'examen de la figure 30v montre que des particules, probablement parmi les premières qui ont été relâchées, ont atteint une profondeur de  $70m$ . On observe une accélération de la chute des particules à partir de  $20m$ . En surface, le nombre de particules tombe logiquement à 0 puisqu'il s'agit de la limite supérieure de la colonne d'eau. Après 60 jours, les particules ont poursuivi leur progression vers l'ouest alors que 204 particules se sont déjà déposées au fond (60h). La figure 60v les localise à  $90m$  de profondeur. Sur la même figure, on note la présence de deux pics marqués dans la distribution des particules en suspension. Le premier, vers  $20m$  de profondeur est la reproduction du pic observé dans la figure 30v par les 3000 particules supplémentaires relâchées depuis. Les autres particules ont continué leur descente, ralentie à une profondeur de  $60m$ , où elles s'accumulent et forment le deuxième pic. Ces  $60m$  constituent la profondeur qu'auraient atteinte en 60 jours les particules en l'absence d'advection. La distance couverte en profondeur par certaines d'entre elles a été presque doublée. Au-delà du 60e jour, aucune autre particule n'est injectée au point

## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

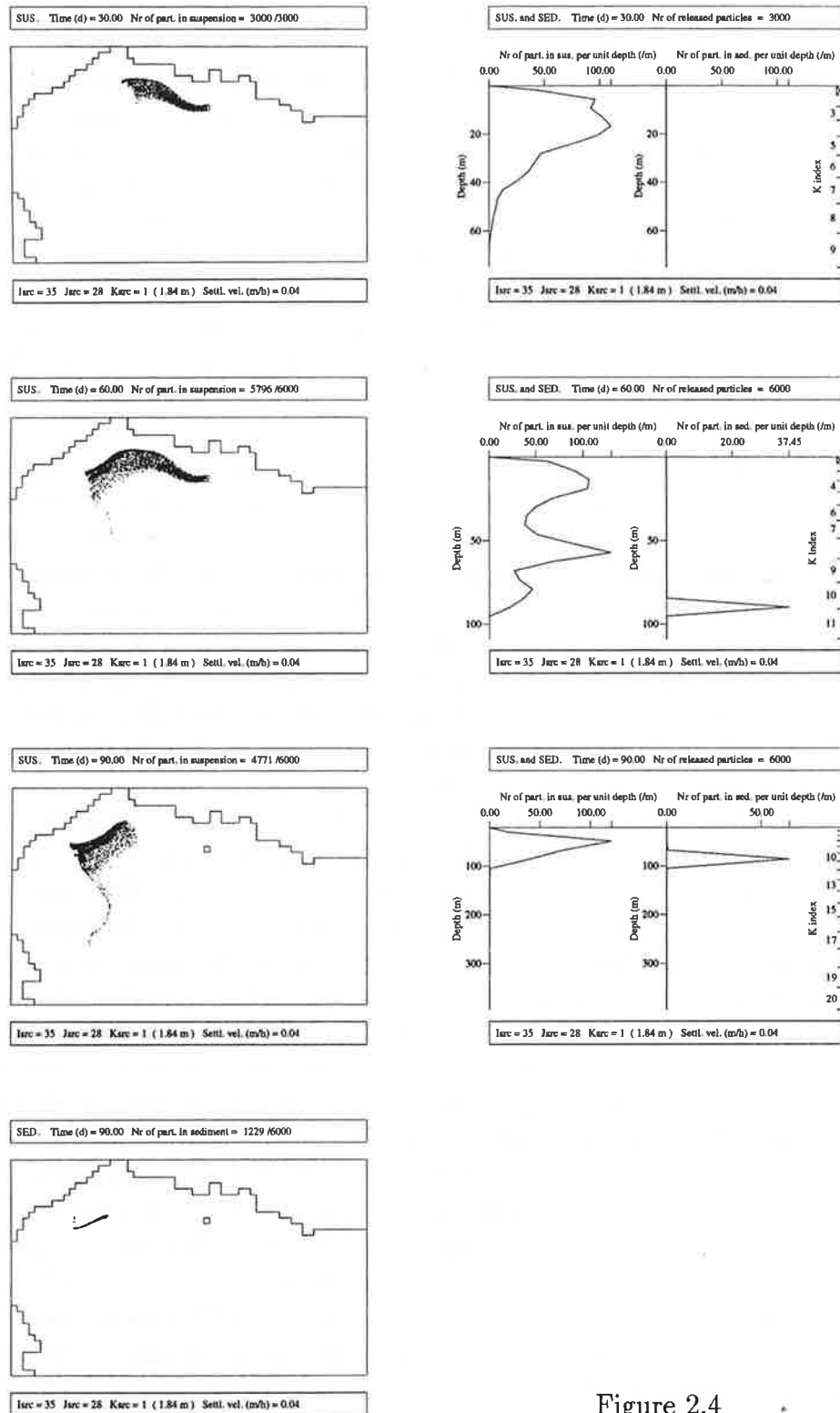


Figure 2.4

source et les particules en suspension continuent d'évoluer dans le domaine. Au 90<sup>e</sup> jour, 1229 particules se sont déposées sur le plateau. Leur distribution sur le fond est décrite par la figure 90b. La concentration des particules sur une zone étroite résulte du fait qu'un champ de vitesse stationnaire advecte les particules issues d'un même point le long de trajectoires identiques. La progression de la plupart des 4771 autres particules en suspension est quasiment stoppée. Un petit nombre d'entre elles sont entraînées au large par la veine principale du courant LP (figure 90h). Ces particules peuvent atteindre une profondeur de plus de 350m, comme le montre la figure 90v où des particules ont été localisées dans la couche  $K = 20$ , même si leur très petit nombre ne permet pas de les repérer sur la courbe de densité. En 30 jours, ces particules ont couvert une distance verticale de 250m environ.

Figure 2.5: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas B. Par rapport au cas A, la localisation du point source reste inchangée mais la vitesse de chute des particules a été quadruplée. Après 30 jours le panache de particules a une forme comparable à celle observée dans la figure 2.4/30h. Sur 3000 particules relâchées, il n'en reste pourtant que deux tiers en suspension. Il a donc fallu une vingtaine de jours pour que les premières particules se déposent sur le plateau à une profondeur de 75 ou 90m (figure 30v). La discontinuité de la distribution verticale du nombre de particules dans le sédiment est un effet de la discrétisation du fond par des palliers successifs. Les distributions horizontale et verticale des particules au temps  $t = 60j$  semblent être la réplique presque parfaite de celles obtenues 30 jours auparavant si ce n'est que la densité verticale de particules déposées a été multipliée par quatre (figures 60h et 60v). En fait les 3000 particules injectées dans le laps de temps ont simplement remplacé les 3010 particules qui se sont déposées dans le même intervalle. Après 90 jours, plus aucune particule n'est dans la colonne d'eau; elles se sont toutes déposées sur le plateau continental à une distance de 50km environ de leur point source.

Figure 2.6: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas C. Le point source est localisé dans la partie SO du plateau continental, en surface, à hauteur de la tête du canyon de Lacaze-Duthiers. Il est donc situé dans le tourbillon anticyclonique observé dans les figures 2.2/k1 et 2.2/k4. Ce tourbillon entraîne rapidement les particules dans un mouvement circulaire descendant. La vitesse verticale du fluide accélère la chute des particules jusqu'à un palier de 90m (30v). Elles s'y accumulent un temps puis poursuivent, pour un certain nombre, leur migration dans le courant le long de la pente continentale, tandis que d'autres vont se déposer en bordure du plateau entre 100 et 200m (figure 60v). Après 90 jours la plus grande

## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

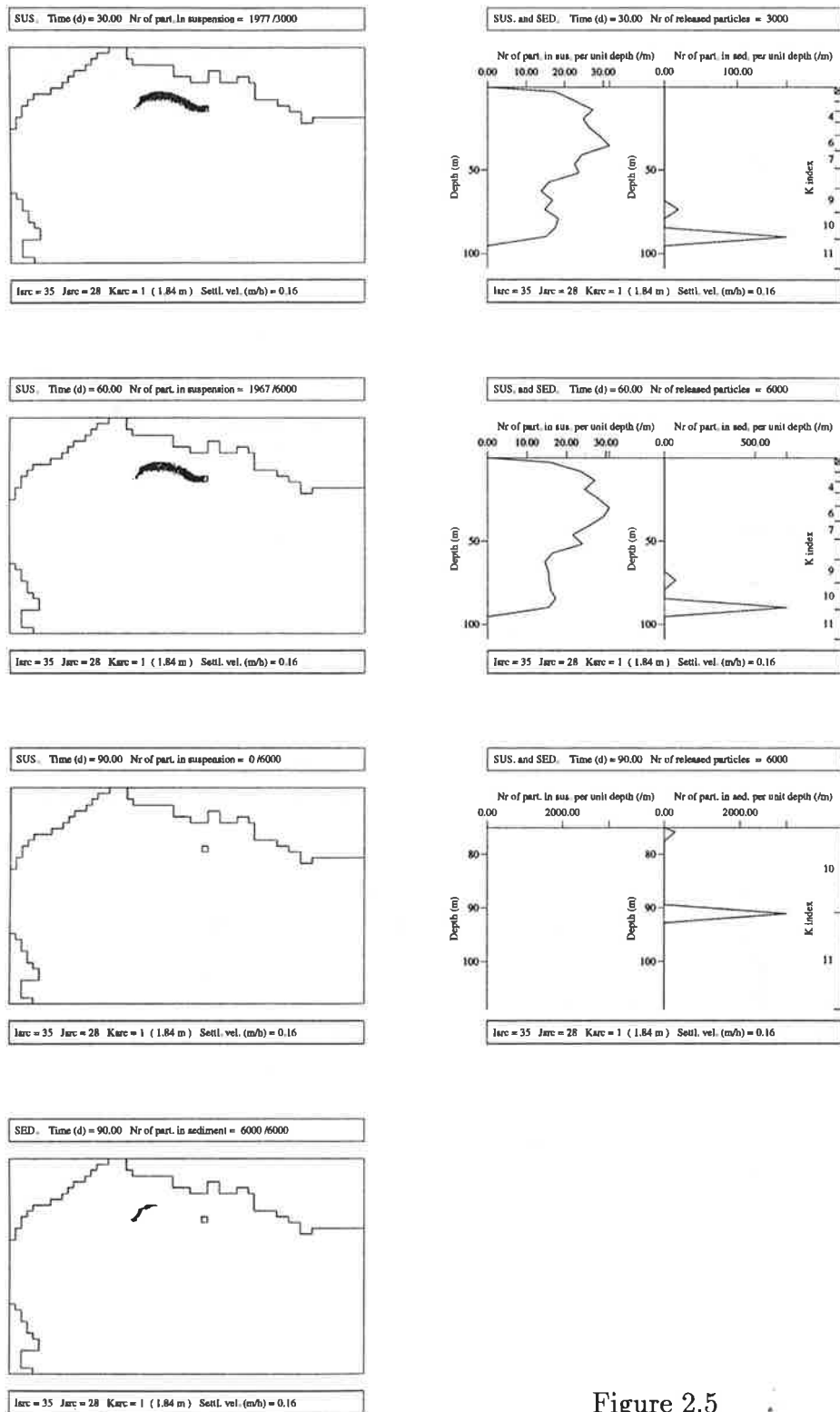


Figure 2.5

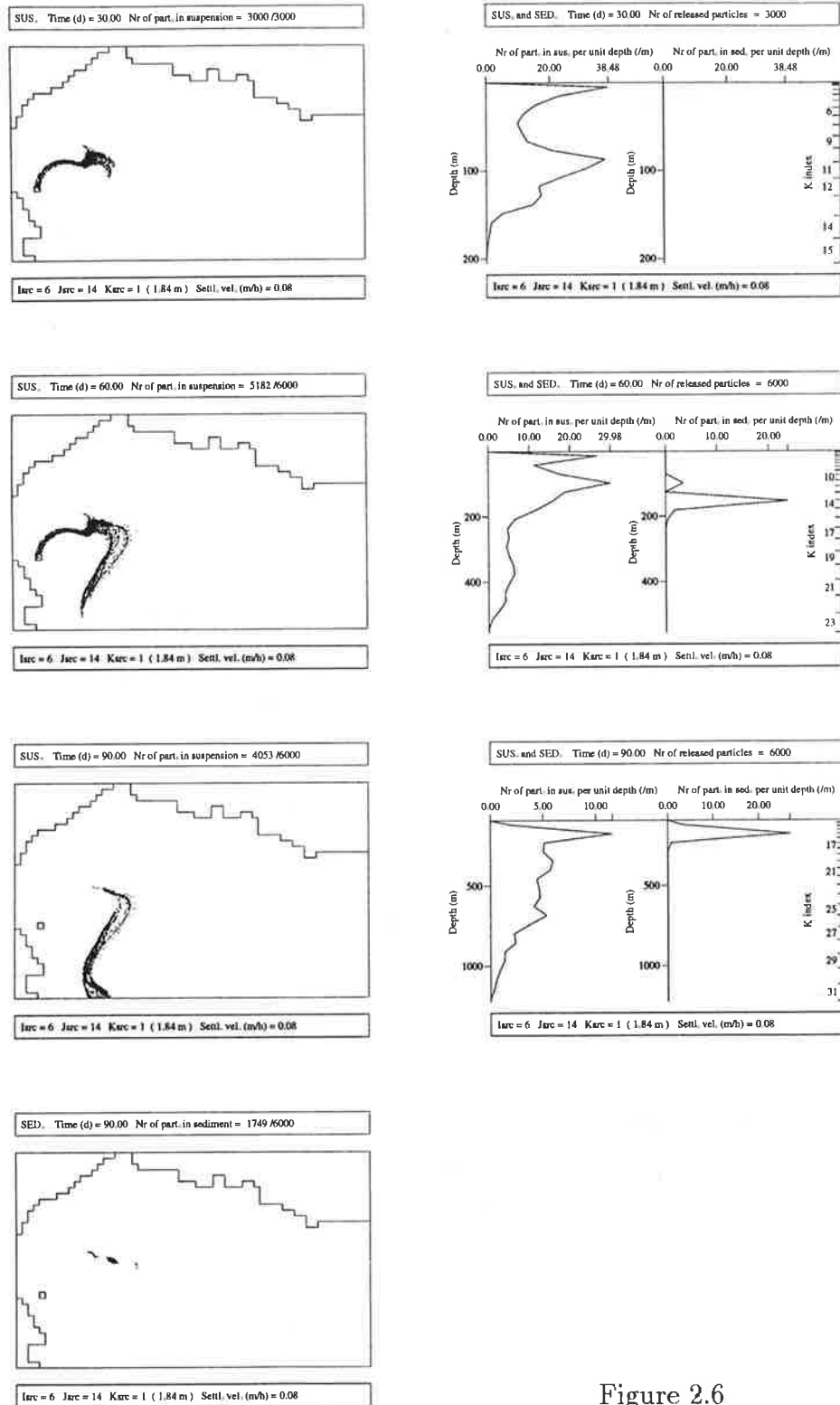


Figure 2.6

## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

---

partie des 4053 particules encore en suspension sont ou seront advectées par le courant LP au-delà des limites du Golfe du Lion et moins d'un tiers du matériel relâché s'y sera déposé.

---

Figure 2.7: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas D. La vitesse de chute est doublée par rapport au cas C et la physiologie du panache de particules change fortement. Le même mouvement anticyclonique est observé au départ (30h), mais, arrivées au palier de 90m, les particules infléchissent alors leur trajectoire vers l'ouest pour se déposer rapidement au nord de leur point source, entre 90 et 100m de profondeur. Un temps de résidence de moins de 30j et une densité verticale moyenne de 21 ou 22 particules en suspension par m (30h ou 30v) sont en bon accord avec les valeurs du tableau 2.1. Ceci traduit, en moyenne, une influence moindre de l'advection verticale.

---

Figure 2.8: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas E. Les particules se trouvant dès l'instant initial dans le courant LP, leur advection durant les 30 premiers jours est rapide, à une vitesse moyenne de 6km/j ou 7cm/s (30h). Le courant module également leur chute verticale comme le montre la figure 30v mais le matériel reste en suspension au-dessus de 70m. Entre le 30e et le 60e jour, la progression des particules est ralentie. Au 60e jour, 807 d'entre elles se sont déposées à une profondeur de 100m environ et quelques particules continuent leur cheminement vers le large. Au 90e jour, on retrouve ces dernières à la limite sud du domaine. La majeure partie du matériel se dépose toutefois sur le plateau.

---

Figure 2.9: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas F. Les particules sont supposées avoir la même densité que le fluide et ont donc une vitesse verticale nulle. En 30 jours, ces particules ont pratiquement traversé le domaine tout entier (30h) en demeurant près de la surface (30v). Leurs trajectoires s'enroulent alors dans le tourbillon qui provoque une dispersion importante et une migration en profondeur. Après 90 jours, 5657 particules sont en suspension dans la colonne d'eau sur une hauteur de 350m, 342 particules continuent leur périple le long des côtes espagnoles et le solde du matériel, c.-à-d. une particule, s'est déposé. Le pic de la distribution verticale des particules dans le sédiment sur la figure 90v est la trace de ce dépôt. En 90 jours, une particule se déplaçant depuis la surface sous la seule action de l'advection du fluide peut donc traverser le Golfe du Lion tout entier et se déposer à son autre extrémité.

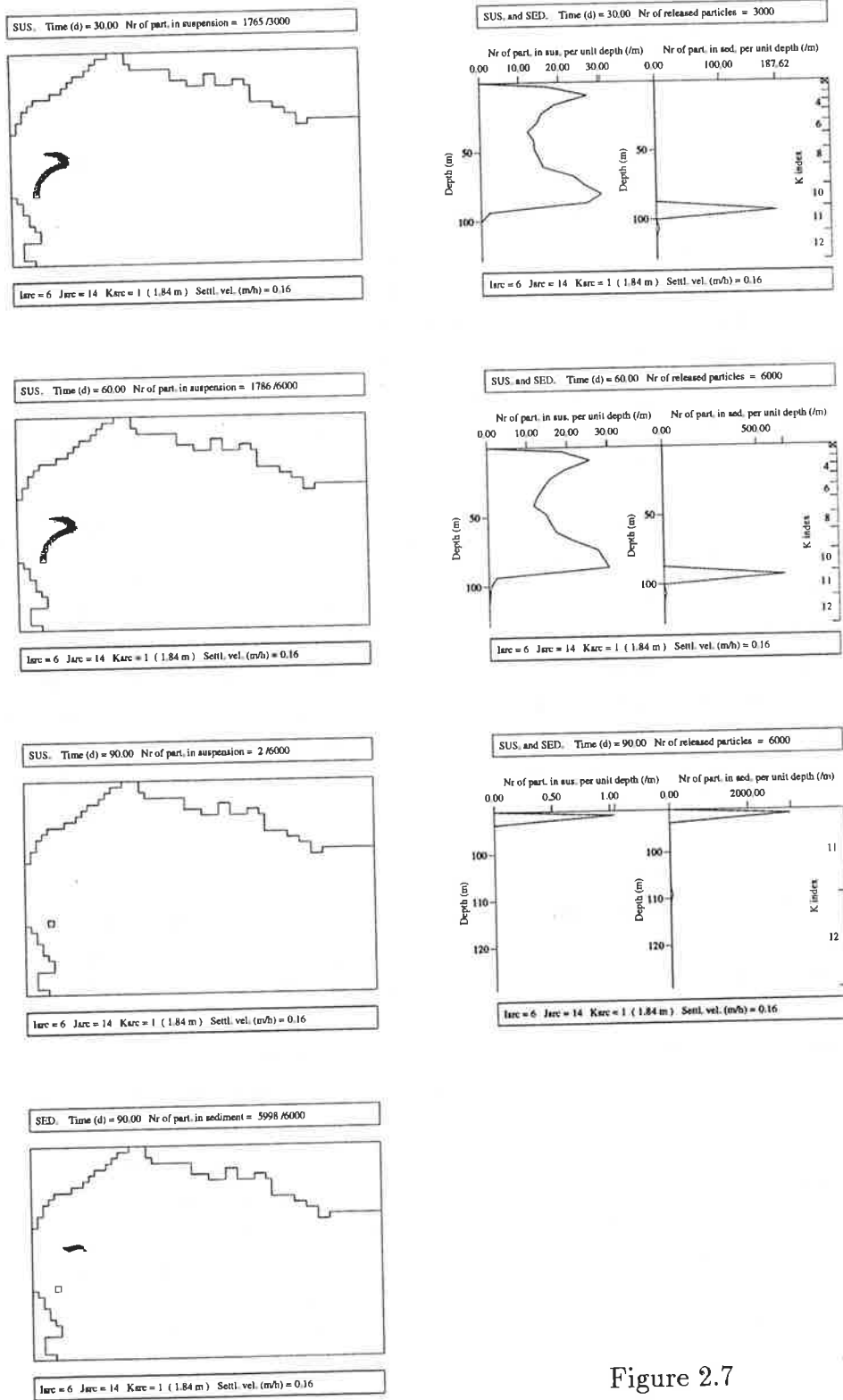


Figure 2.7

## 2.1 Circulation moyenne estivale (juillet)

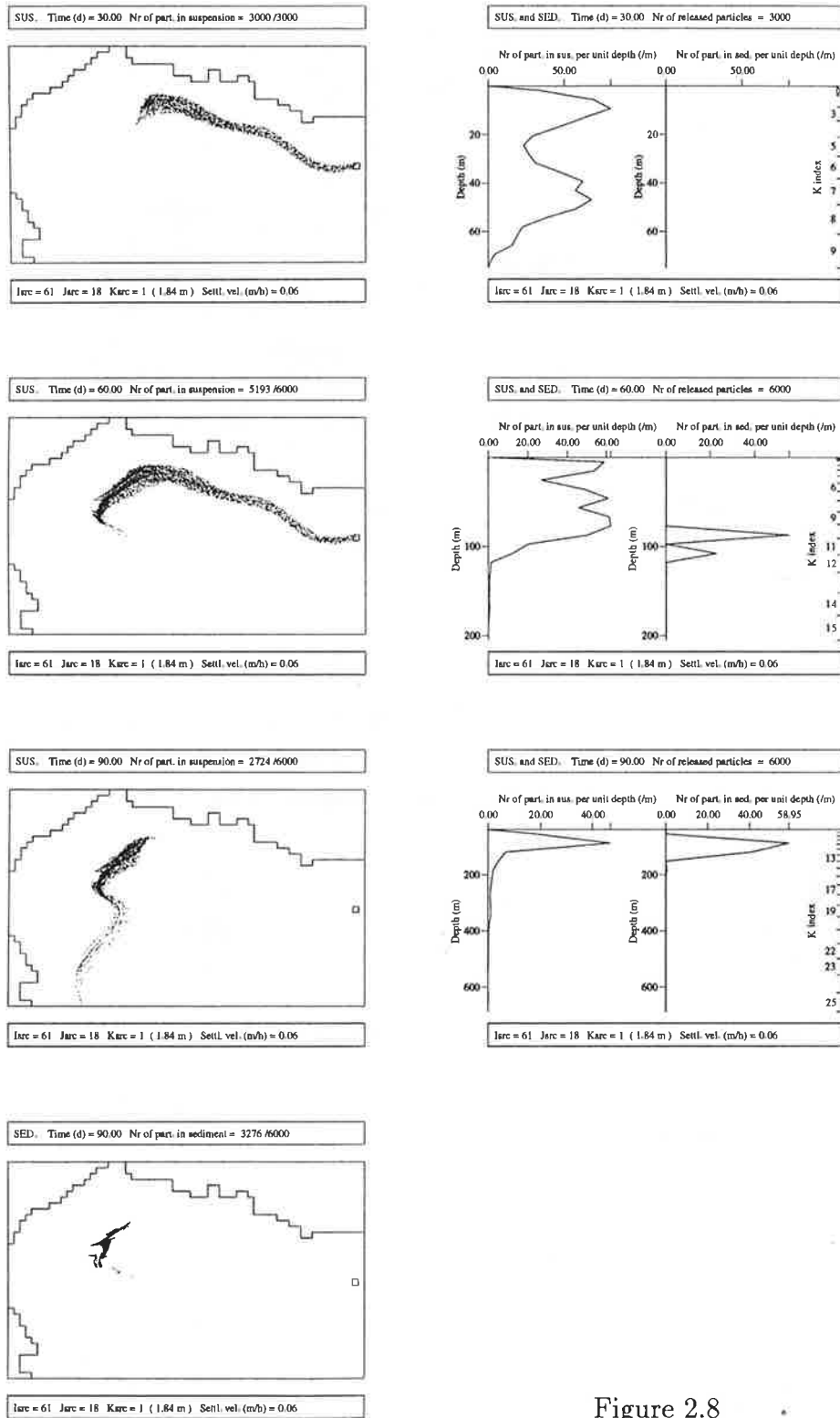


Figure 2.8

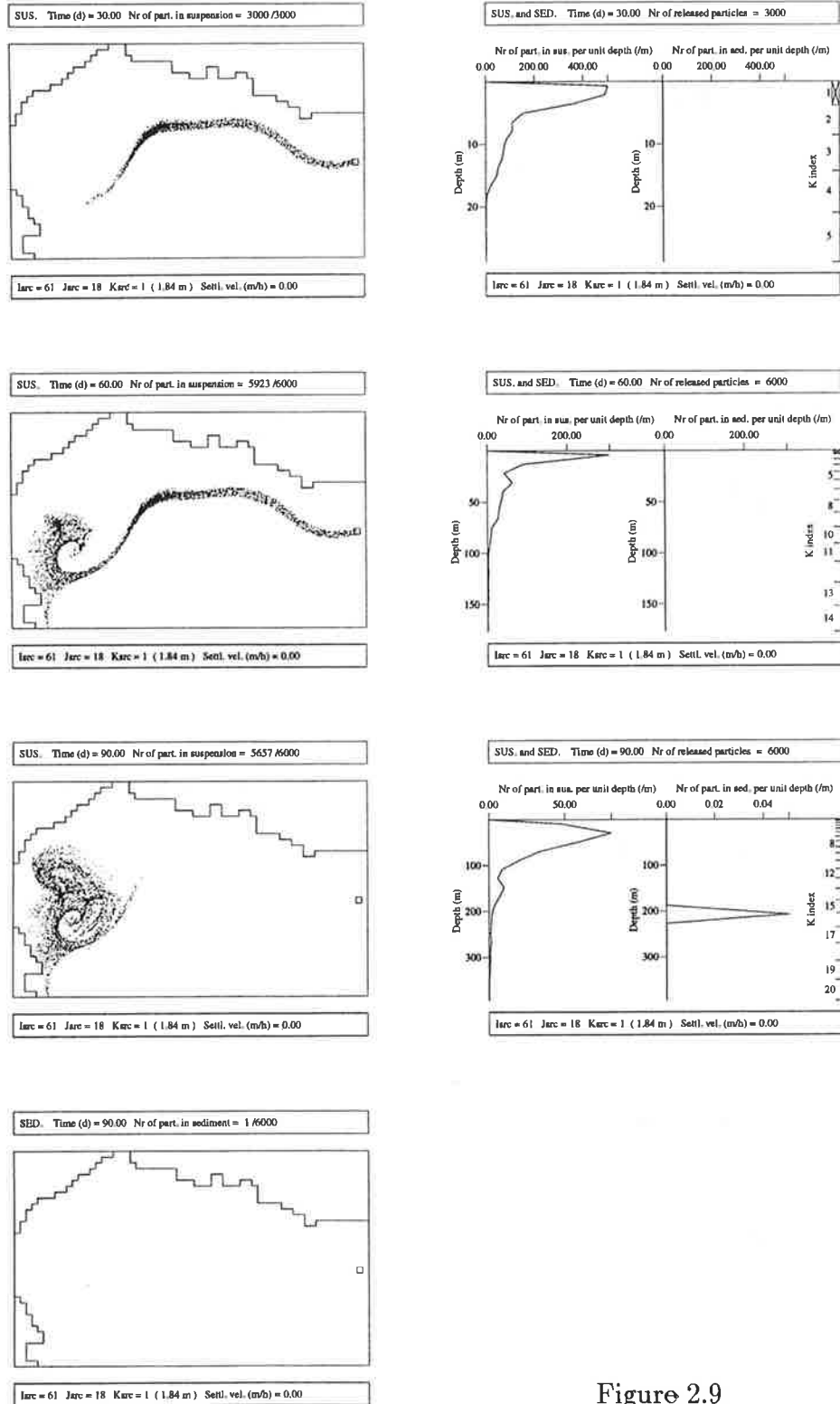


Figure 2.9

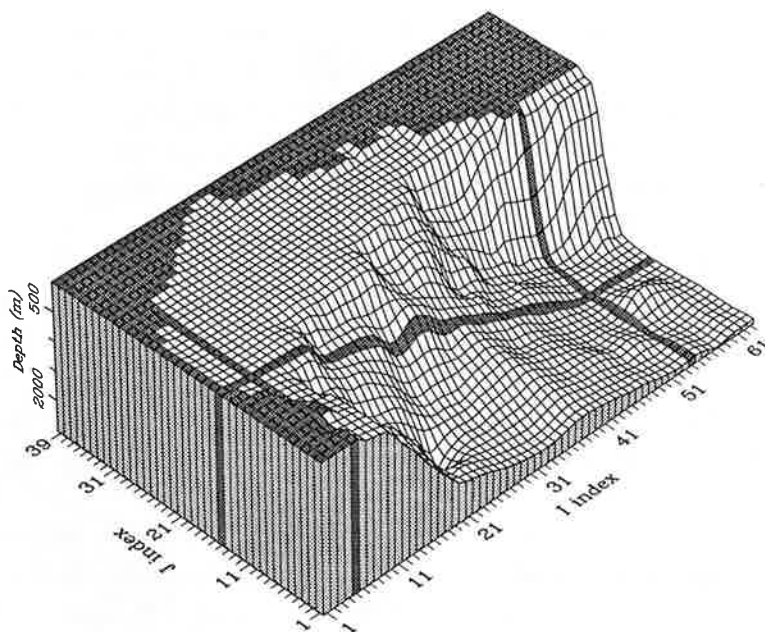


Figure 2.10

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

### 2.2.1 Simulation hydrodynamique

La simulation effectuée ici vise à déterminer la réponse hydrodynamique à un vent persistant du NO auquel succède une période de calme. Pour ce faire, on schématise le forçage en fixant un champ de vent uniforme. Le vent souffle à  $15m/s$  du secteur NO ( $330^\circ$ ) durant les 4 premiers jours de la simulation. Les 4 jours qui suivent, le vent est coupé.

Les résultats sont décrits par les figures 2.10 à 2.15.

---

Figure 2.10: Localisation des coupes verticales.

---

Figure 2.11: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température après un jour de vent constant ( $15m/s$ ) du secteur NE ( $330^\circ$ ). En surface ( $K = 1$ ), le champ de vitesse est globalement orienté au SSO. La vitesse atteint, au large, un maximum de  $85,74cm/s$ . La vitesse moyenne est de l'ordre de  $50cm/s$ . Cette advection rapide dans la couche de surface induit un mouvement d'upwelling le long du littoral N, où la température chute jusqu'à  $16^\circ C$  en certains points, soit environ  $4^\circ C$  de moins qu'au large. Le long des côtes au SO, elle provoque un downwelling dont on retrouve la

trace vers 35m de profondeur ( $K = 6$ ). A cette profondeur, un contre-courant ( $\sim 15\text{cm/s}$ ) en direction du NE sur le plateau continental revient alimenter les zones d'upwelling. Au large, le courant reste orienté au SO. A 164m, les champs de température et vitesse sont peu affectés par la circulation de surface à l'exception de la zone proche de la pente où le mouvement du fluide entraîne des masses d'eau vers le plateau. Ce mouvement a une amplitude verticale relativement importante (vitesses verticales de l'ordre de  $0,05\text{cm/s}$ ), et s'étend jusqu'à 400 ou 500m de profondeur (coupes O-E  $J = 15$  et S-N  $I = 54$ ). A l'extrémité O de la coupe  $J = 15$ , on note l'enfoncement des isothermes entre 0 et 30m accompagnant le mouvement de downwelling. La coupe S-N  $I = 5$  permet de visualiser à la fois les zones de downwelling et d'upwelling situées le long de la côte du Roussillon, respectivement sur les parties S et N de celle-ci.

Figure 2.12: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température après 4 jours de vent constant ( $15\text{m/s}$ ) du secteur NE ( $330^\circ$ ). Durant 4 jours, les eaux de surface refroidies par les upwellings ont progressé plus ou moins continûment vers le large (coupe  $K = 1$ ). On remarque que les minima de température se sont déplacés vers l'est. Cela ne résulte pas d'un déplacement des zones d'upwelling mais du fait que le contre-courant qui alimente l'upwelling de la côte NO advecte désormais des eaux plus chaudes issues de la région SO du plateau continental (coupe  $K = 6$ ). Cette circulation plus ou moins fermée sur le plateau participe à l'homogénéisation progressive des eaux dans les 35 à 40 premiers mètres (coupes  $J = 15$  et  $I = 5$ ). Le long du littoral NE par contre, le refroidissement est toujours possible avec des masses d'eaux provenant de zones plus profondes (coupe  $I = 54$ ).

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

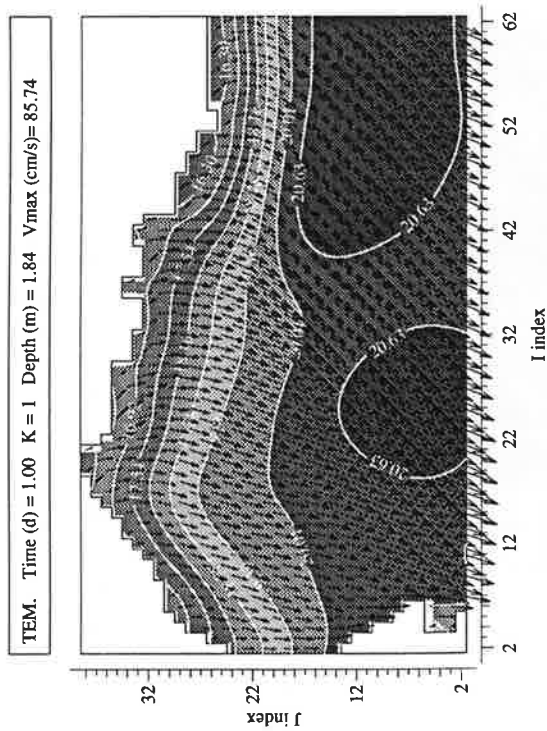
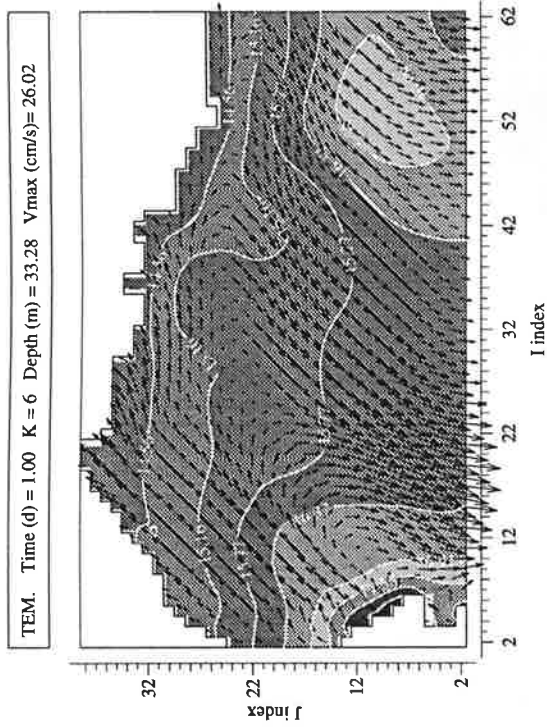
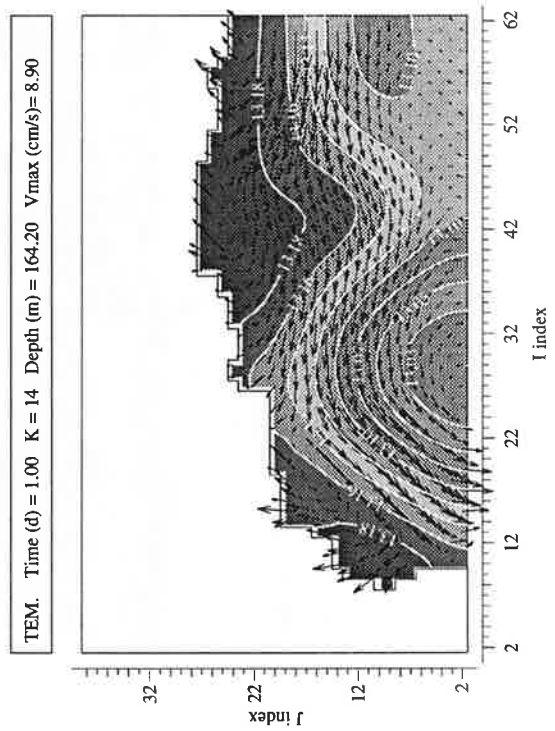
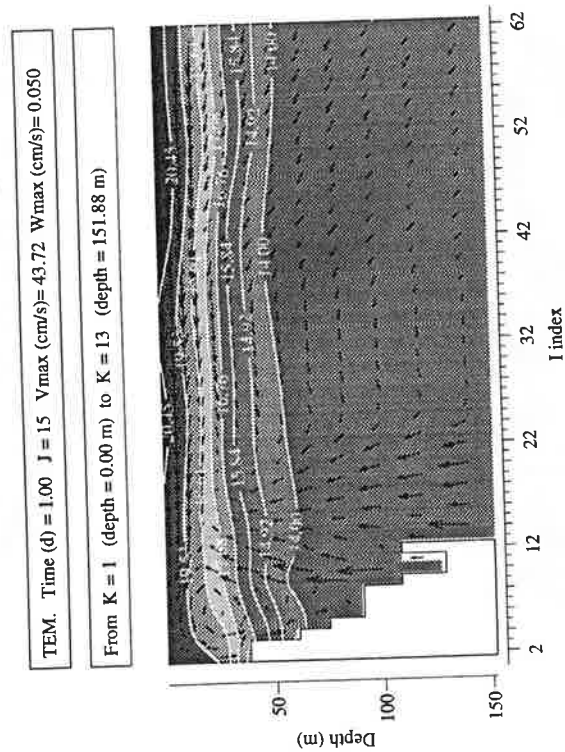
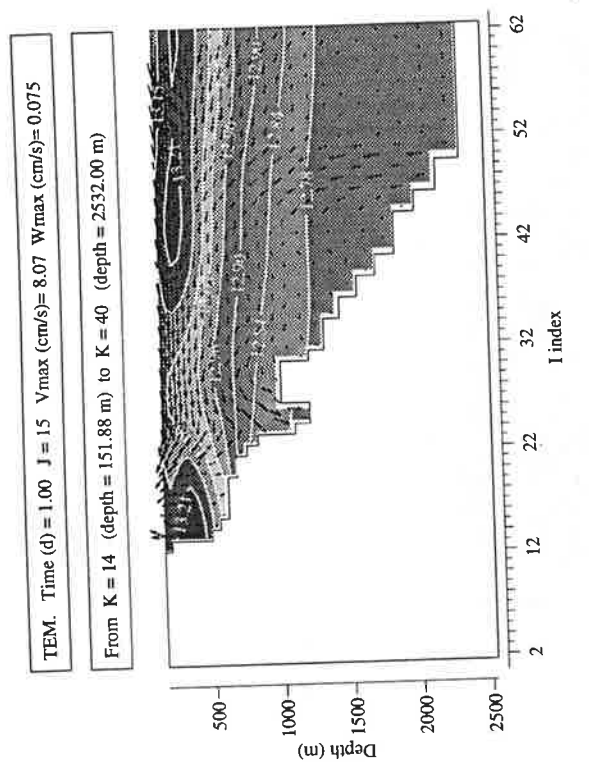


Figure 2.11: début





## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

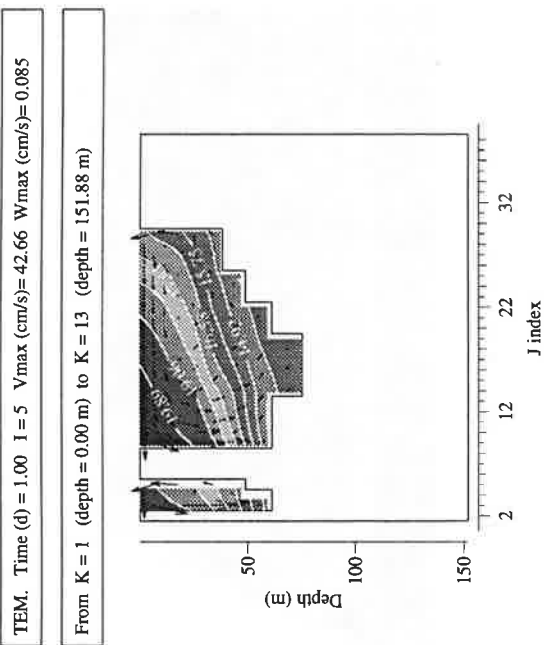
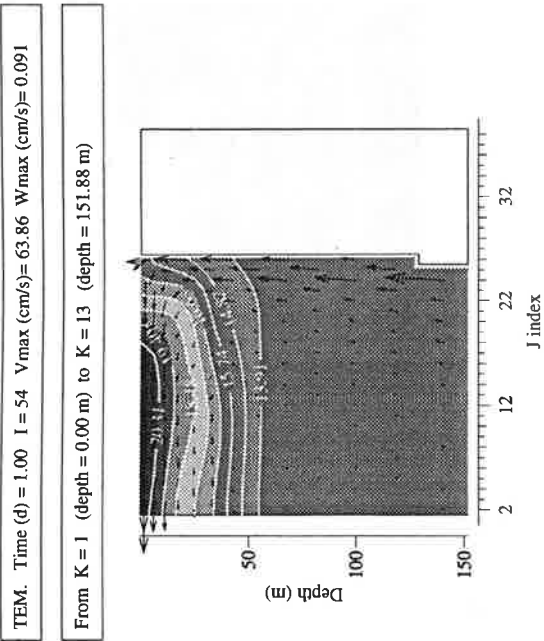
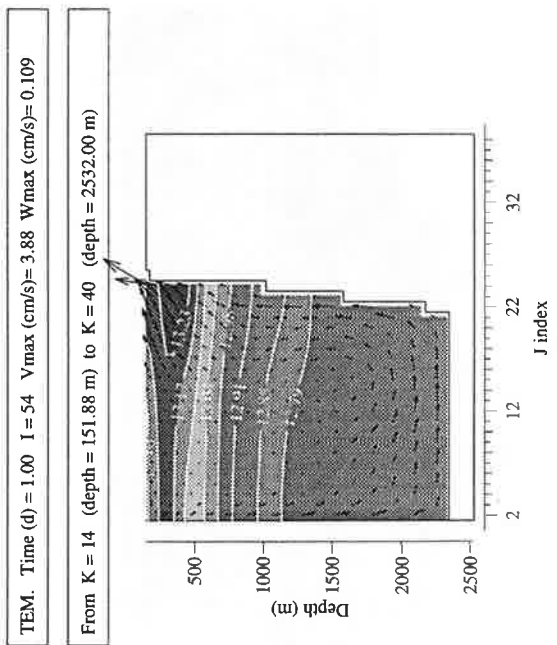


Figure 2.11: fn



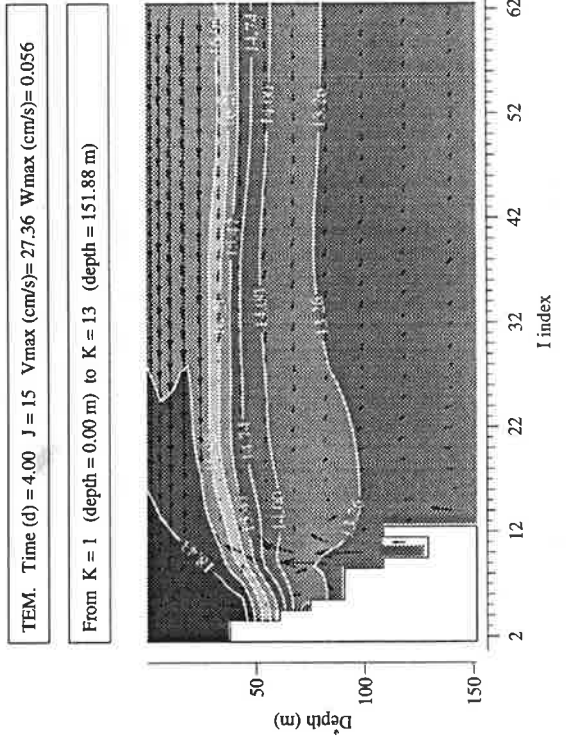
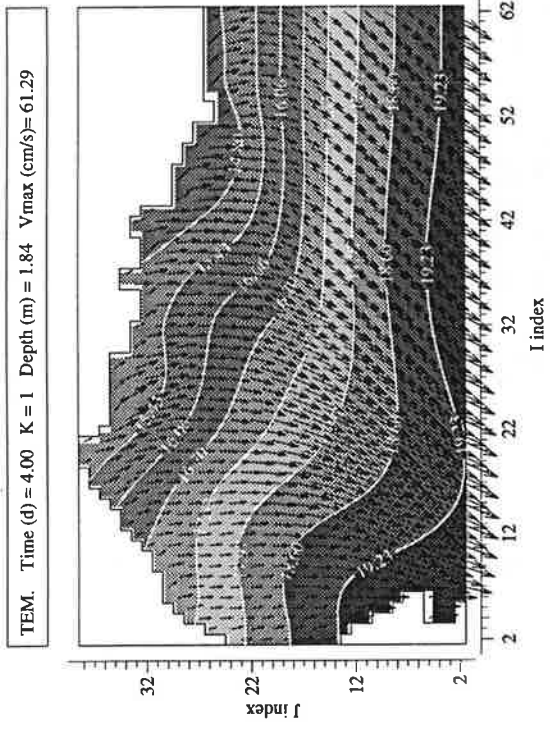
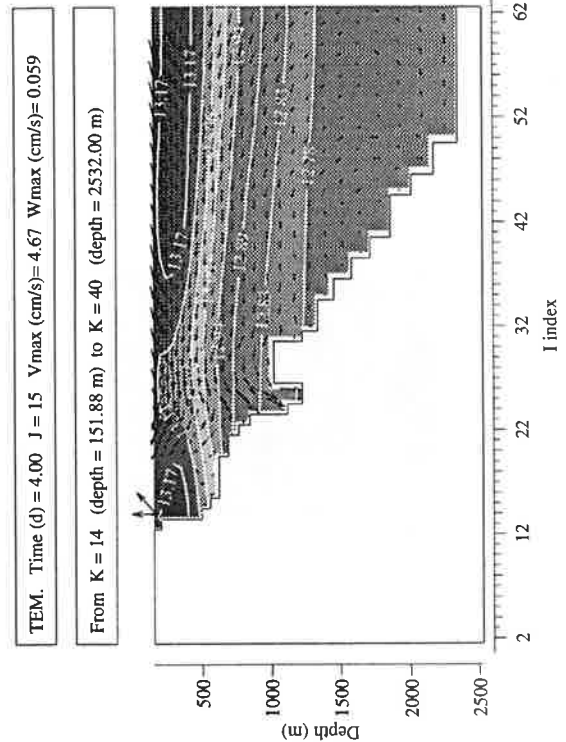
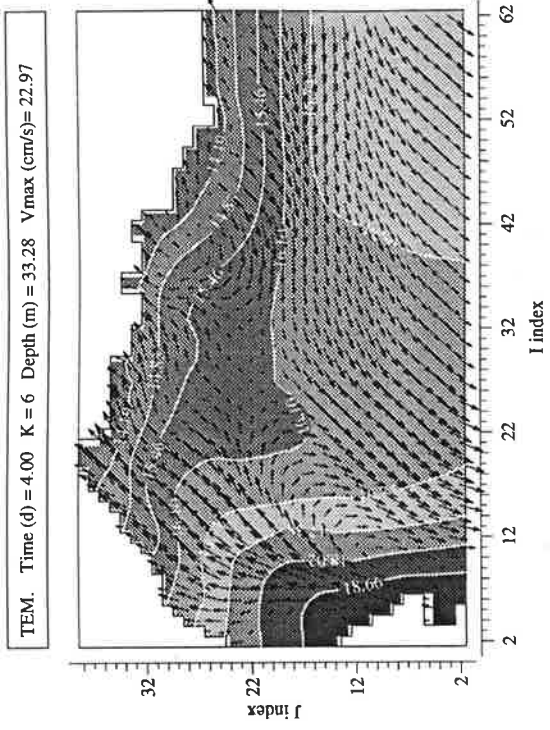


Figure 2.12: début

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

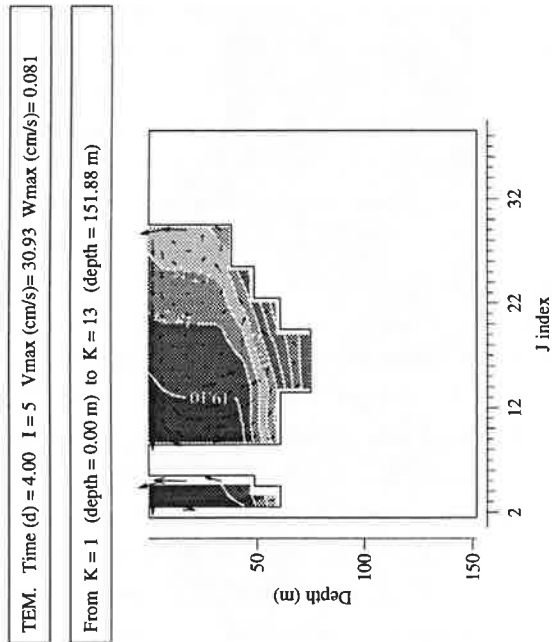
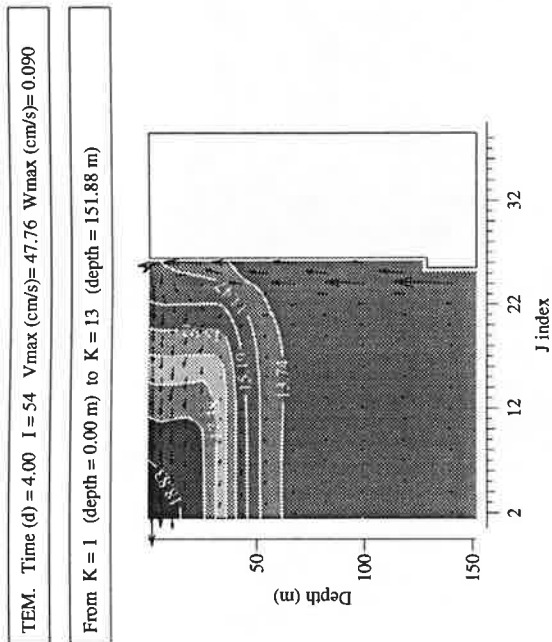
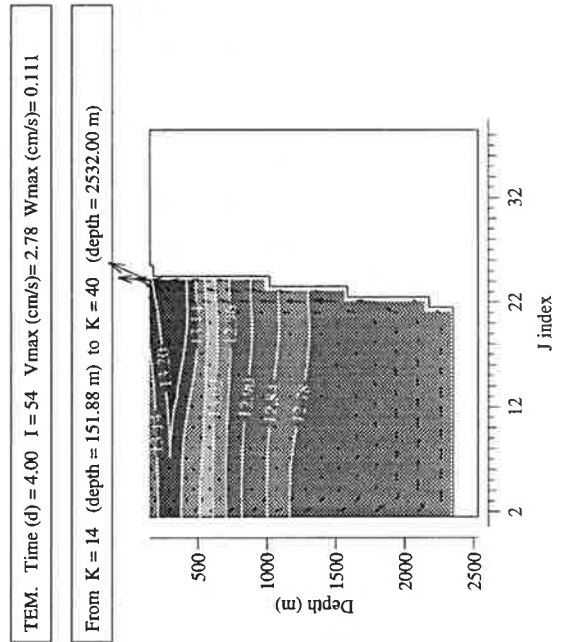


Figure 2.12: fin



SURF. PRESSURE Time (d.hh) = 4.00 Zmin (cm) = -9.43 Zmax (cm) = 8.24

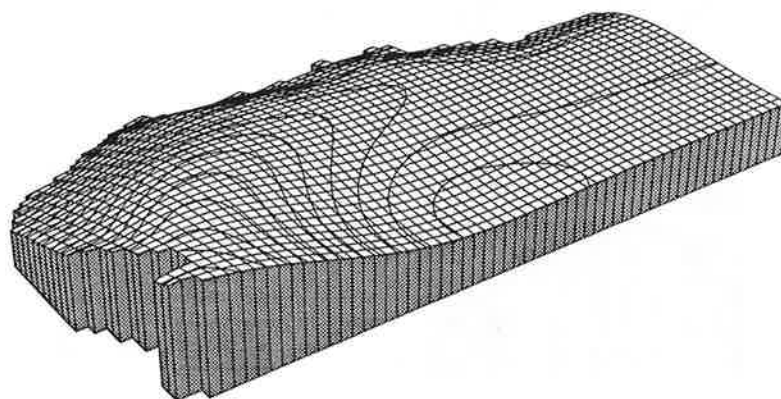


Figure 2.13

Figure 2.13: Champ de pression de surface après 4 jours de vent du NO. Le vent provoque une dépression tout le long du littoral N. La pression est maximale en bordure du plateau continental et dessine une crête qui en suit le contour. La pente de la surface est importante; il y a 18cm de différence d'élévation entre minimum et maximum.

Figure 2.14: Coupes horizontales des champs de vitesse et salinité après 5 jours, soit un jour après que le vent ait été coupé. La variation brutale du forçage par le vent a généré des oscillations d'inertie qui se traduisent, sur les coupes  $K = 1$  et  $K = 6$ , par la rotation des vecteurs vitesses avec une période de 17h30' environ. En 24 heures, la rotation a donc couvert  $360 + 135^\circ$ . Les champs de vitesse à 2 et 33m de profondeur sont quasi en phase. La coupe S-N  $I = 5$  montre un redressement progressif des isothermes.

Figure 2.15: Coupes horiz. et vert. des champs de vitesse et température après 7 jours, soit 3 jours après que le vent ait été coupé. Les oscillations d'inertie perdurent (coupe  $K = 1$ ), influençant également les mouvements verticaux. A l'instant considéré, le flux est localement ascendant ou descendant (coupes  $I = 54$  et  $J = 15$ ). On note que le long des côtes du Roussillon et du Languedoc, le courant reste orienté parallèlement au littoral quelle que soit son orientation ailleurs dans le golfe (coupes  $K = 1$  et  $I = 5$ ).

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

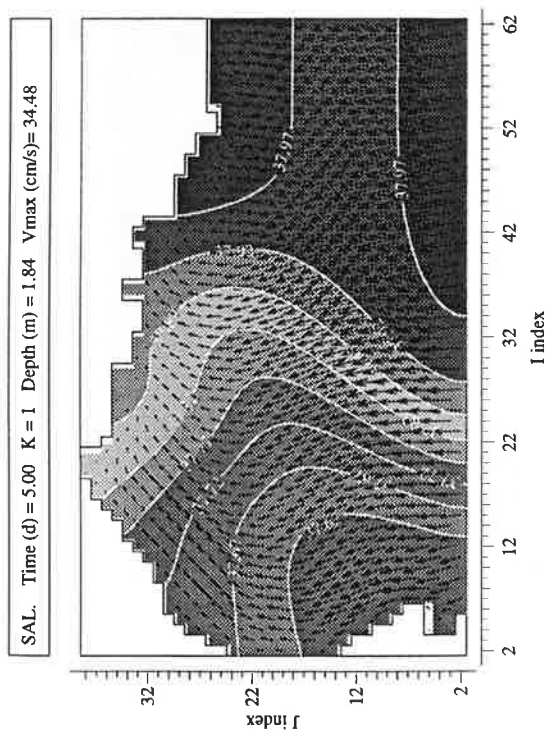
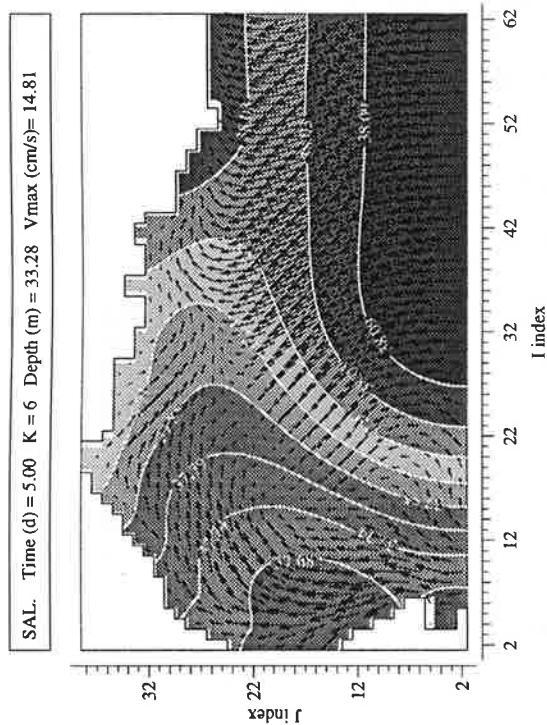
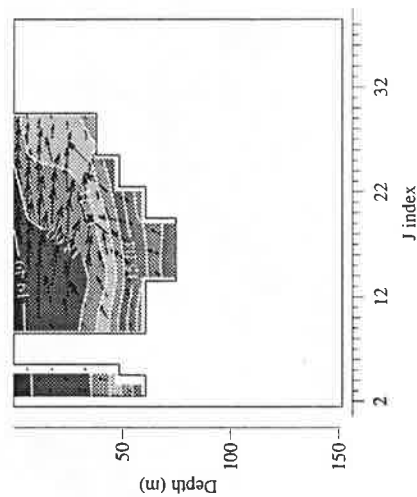


Figure 2.14

TEM. Time (d) = 5.00 I = 5 Vmax (cm/s) = 12.56 Wmax (cm/s) = 0.010

From K = 1 (depth = 0.00 m) to K = 13 (depth = 151.88 m)



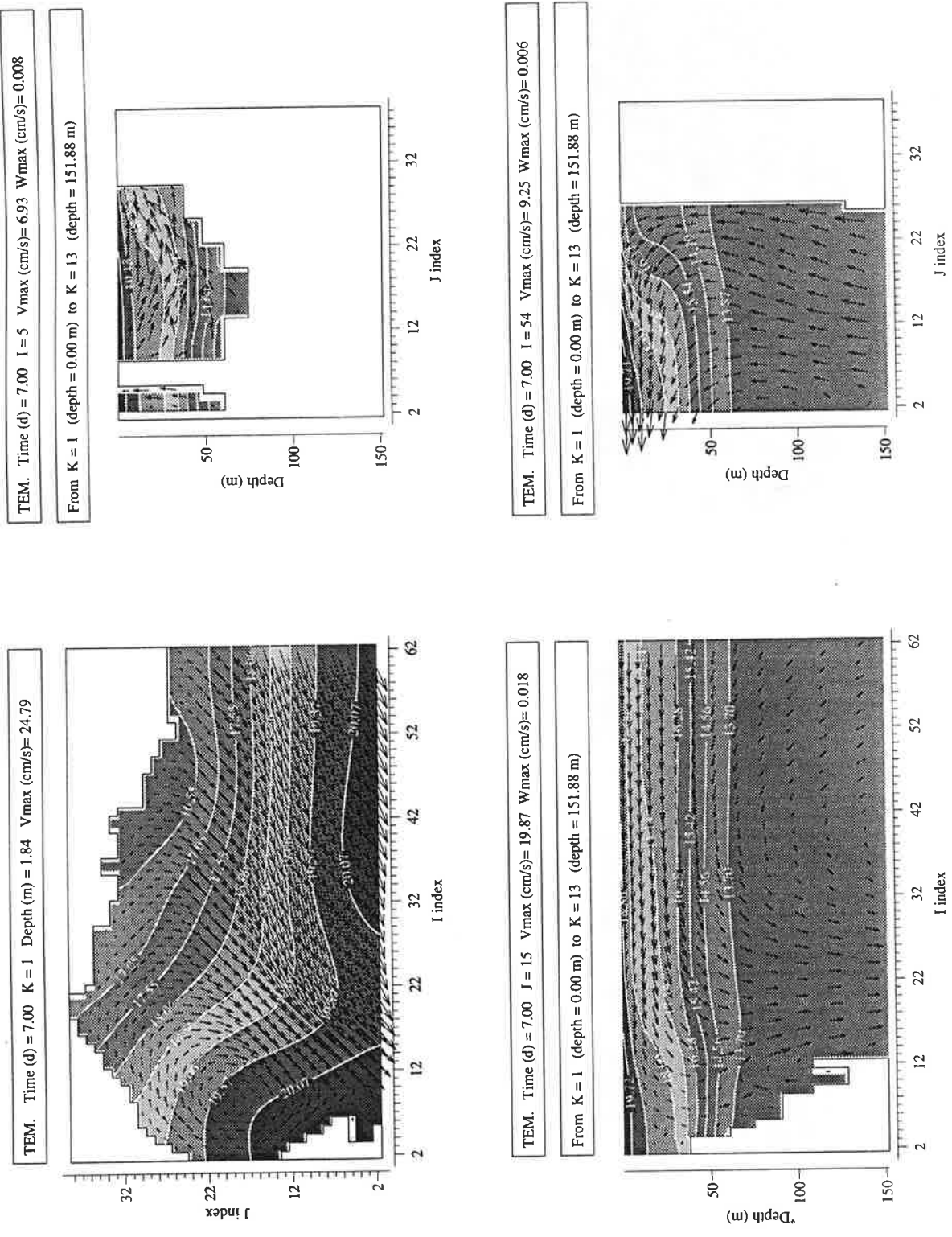


Figure 2.15

### 2.2.2 Transport de particules

Tout au long des huit jours de la simulation hydrodynamique, des particules ont été relâchées à plusieurs points sources et leurs trajectoires ont été intégrées sur la même période.

Six cas d'étude ont été retenus. Le tableau 2.2 précise pour chacun d'eux les différents paramètres. Les figures 2.16 à 2.21 présentent les résultats du calcul de transport pour les cas G à L.

<i>cas</i>	$(I, J, K)_{src}$	<i>débit</i>	<i>vit. de chute</i>	$\Delta h/10j$	<i>dens. <math>d_0</math></i>	<i>figure</i>
G	(35, 30, 1)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.16
H	(35, 30, 1)	$500 j^{-1}$	0,48 m/h	115,2 m	$43,4 m^{-1}$	2.17
I	(35, 30, 9)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.18
J	(6, 14, 5)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.19
K	(6, 14, 5)	$500 j^{-1}$	0,48 m/h	115,2 m	$43,4 m^{-1}$	2.20
L	(15, 22, 10)	$500 j^{-1}$	0,12 m/h	28,8 m	$173,6 m^{-1}$	2.21

Tableau 2.2: Tableau synoptique des différents paramètres pour le calcul du transport des particules.

Figure 2.16: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas G. Des particules avec une vitesse de chute de 0,24m/h sont relâchées en surface à quelques kilomètres de l'embouchure du Rhône, avec un débit constant de 500 particules par jour. Elles sont alors rapidement entraînées vers le SO par le courant de surface. En 2 jours, les premières ont couvert une distance de près d'une centaine de km et se retrouvent vers 13 ou 14m de profondeur. Les 2 jours suivants, durant lesquels le vent souffle toujours, elles continuent leur progression sensiblement au même rythme. Sous l'action du vent, une couche d'Ekman s'est développée sous la surface, où les vitesses sont déviées graduellement vers la droite avec la profondeur, décrivant une spirale (d'Ekman). Au fur et à mesure de leur enfoncement dans la colonne d'eau, les particules subissent cette déviation du courant qui infléchit leurs trajectoires, comme cela apparaît sur la distribution horizontale. Lorsque le vent est coupé, l'amplitude des courants se réduit progressivement et ceux-ci se mettent à tourner à la fréquence d'inertie. Le déplacement horizontal net des particules entre le 4e et le 8e jour est donc moindre que durant les jours précédents. On note qu'au point source, le flux est alors dirigé vers l'est et que les particules s'y accumulent davantage. Au 8e jour, la distribution verticale des particules est presque homogène avec des valeurs de densité proches de  $d_0 = 86,8$  particules par mètre de colonne d'eau que l'on obtiendrait en l'absence d'advection verticale (voir tableau 2.2).

Figure 2.17: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas H. Par rapport au cas G, la localisation du point source est inchangée mais la vitesse de chute des particules a été doublée. Après 2, 4 ou 8 jours, la distance verticale parcourue est double de ce qu'elle était dans le cas précédent. Avec une vitesse de chute plus grande, les particules quittent plus rapidement la couche superficielle où l'advection est la plus intense. Leur déplacement horizontal est donc moindre et après 4 jours les premières particules se trouvent vers 40m de profondeur, dans cette région, plus ou moins à hauteur de la bordure du plateau continental, qui sépare le courant du large orienté au SO et celui du plateau orienté au SE (voir coupe  $K = 6$  sur la figure 2.12). A cet endroit, la vitesse du fluide est faible et les particules ne progressent plus guère. Lorsque le vent est coupé, on note l'orientation du flux de particules à l'est du point source. En 8 jours, une particule a atteint le fond, vers 90m de profondeur.

---

Figure 2.18: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas I. La vitesse de chute est de 0,24m/h. Le point source est toujours localisé à proximité de l'embouchure du Rhône mais il a été déplacé en profondeur vers les 70m. Il se trouve donc dans une zone d'upwelling où les vitesses verticales atteignent par endroits des valeurs de plusieurs dixièmes de mm/s. Après les deux premiers jours, la majeure partie du matériel se trouve dans la colonne d'eau à hauteur de la source alors que quelques particules sont remontées d'une petite vingtaine de mètres. Le mouvement s'accélère ensuite et après 4 jours, des particules sont arrivées en surface où elles sont alors advectées vers le sud. Pour ces particules, on peut évaluer une vitesse verticale moyenne de l'ordre du 0,75m/h, soit, pour le fluide, de 1m/h ou 0,027cm/s environ. Lorsque le vent ne souffle plus, les particules se déposent sur la pente littorale (on relève sur la coupe verticale des dépôts à 40 et 60m) tandis que plus bas dans la colonne d'eau, celles qui ont été relâchées entre le 5e et le 8e jour s'enfoncent lentement pour se déposer juste au N du point source.

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

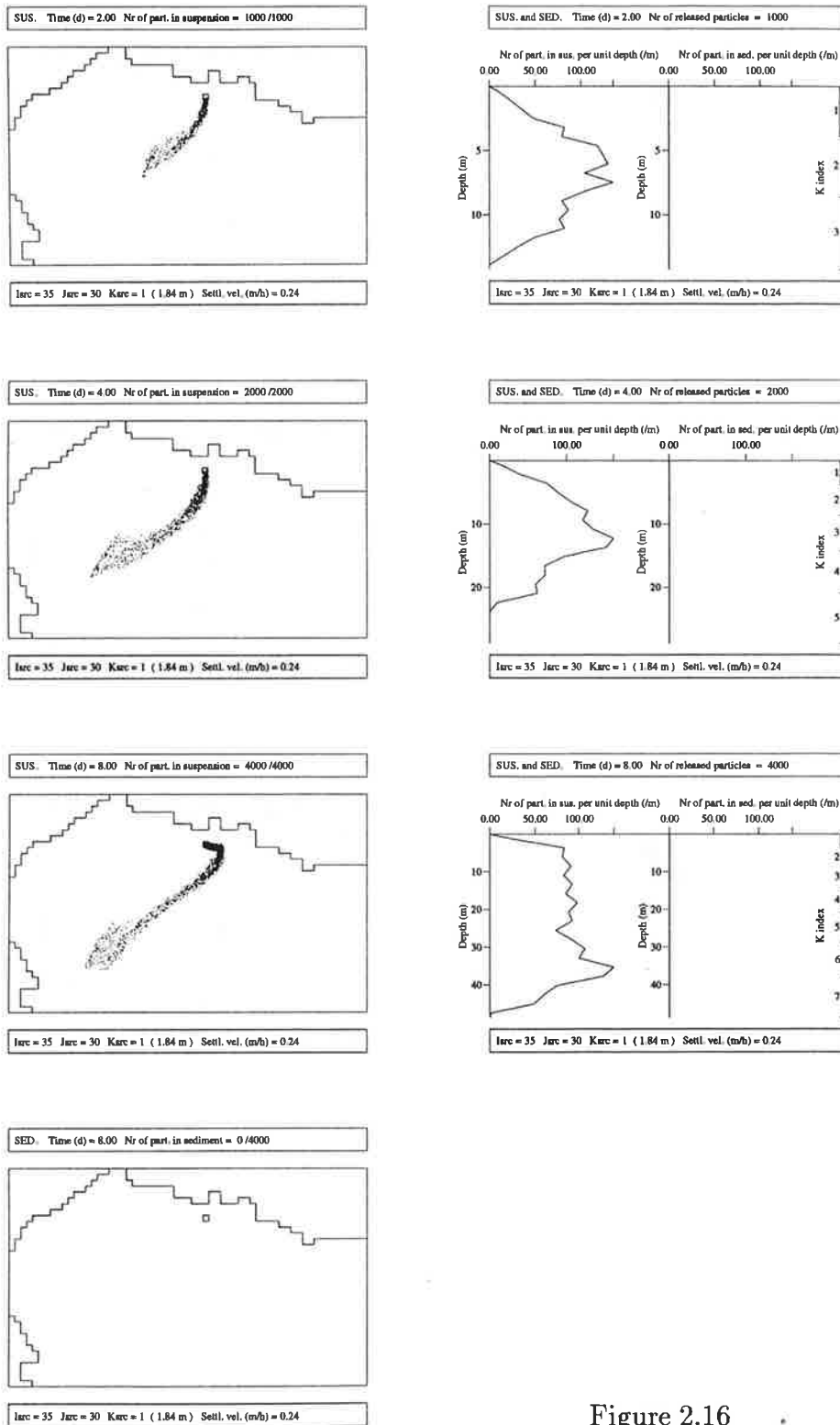


Figure 2.16

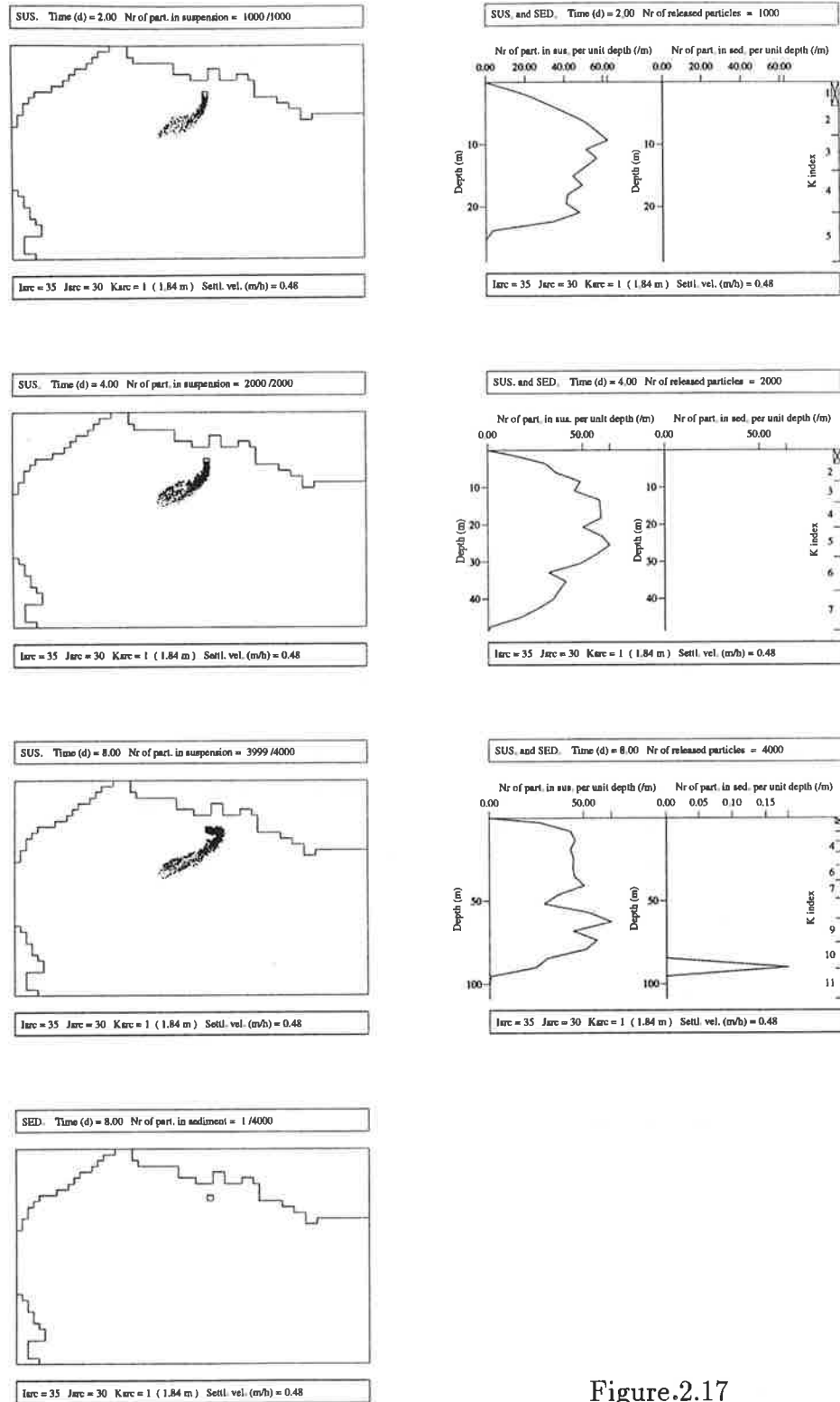


Figure.2.17

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

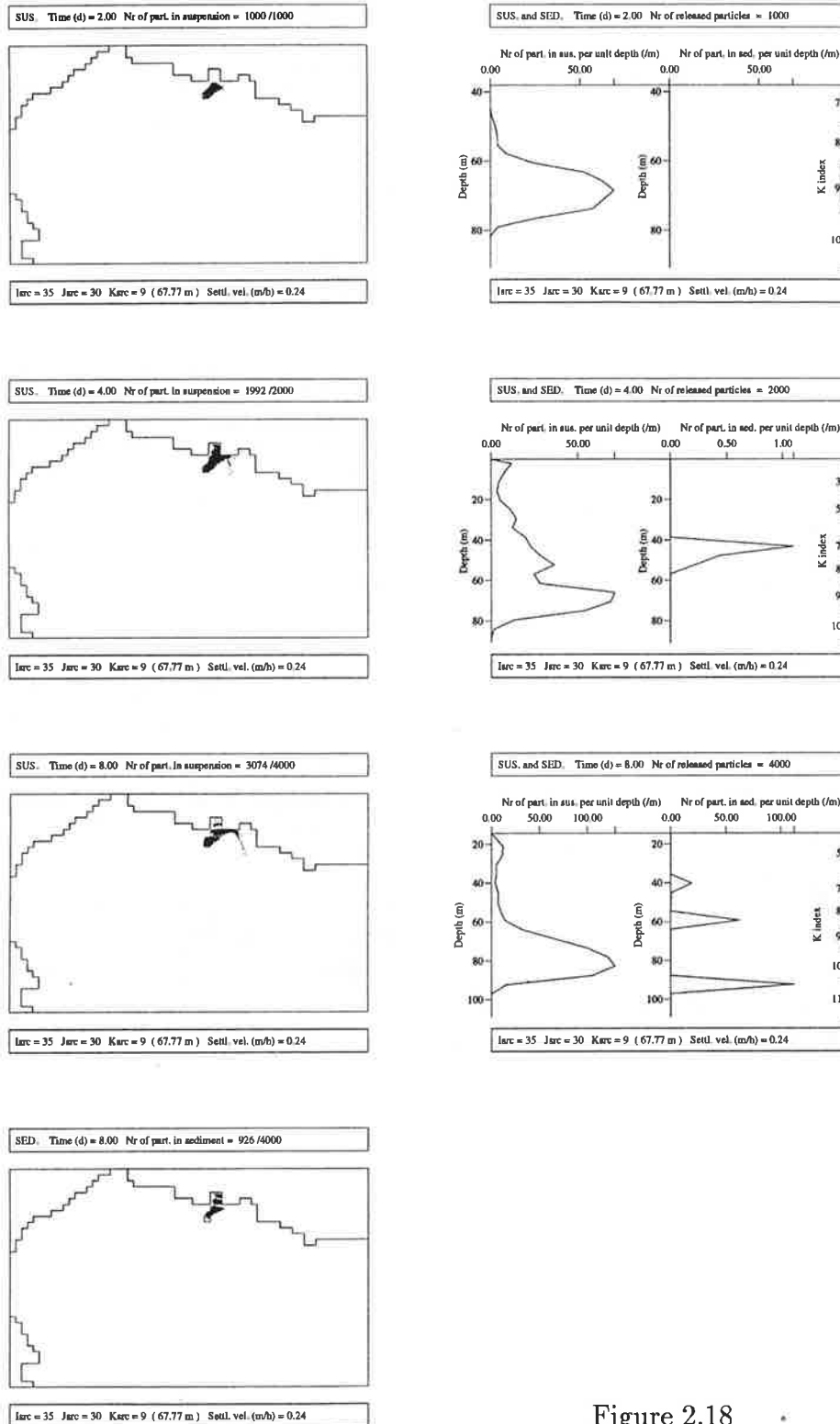


Figure 2.18

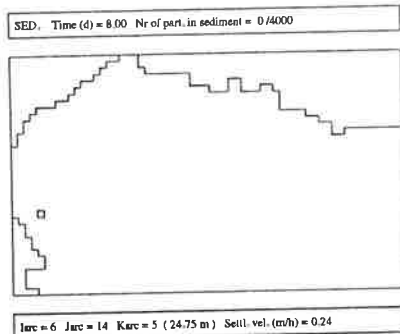
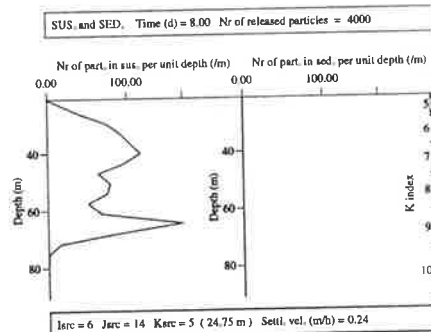
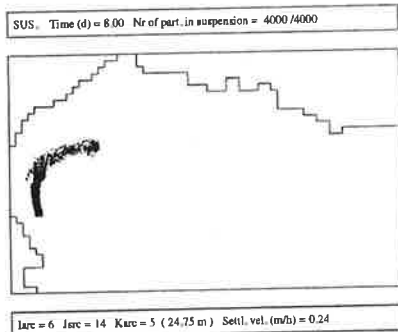
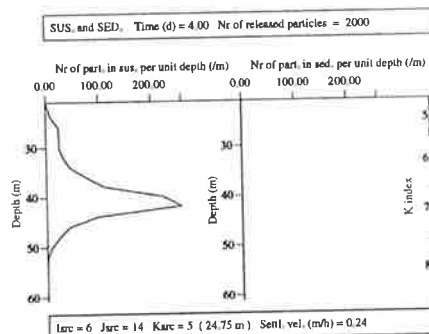
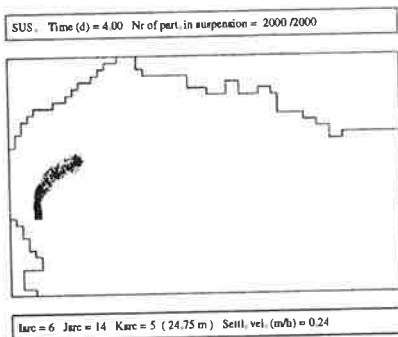
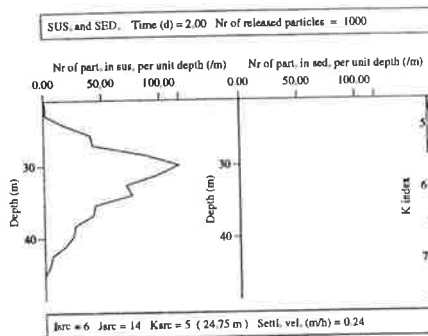
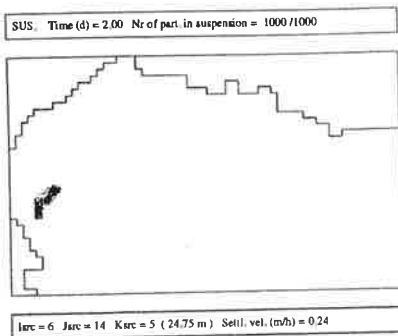


Figure 2.19

Figure 2.19: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas J. Le point source est situé à l'extrémité SO du plateau continental à 25m de profondeur (c.-à-d. au tiers de la hauteur totale de la colonne d'eau) à proximité d'une zone de downwelling. Le downwelling accélère la chute des particules mais seulement sur une courte distance puisqu'après deux jours on observe un pic de la distribution verticale vers les 30m avec une densité de 120 particules par m. Durant les 2 jours qui suivent, ces particules continuent leur migration en profondeur à une vitesse correspondant à la vitesse de chute. Il faut noter que les nouvelles particules relâchées dans l'intervalle ne forment plus de pic à 30m mais qu'à 40m, la densité dépasse 200 particules par m. Ceci résulte de l'extension du downwelling que l'on observe dans les coupes verticales des vitesses (coupes  $J = 15$  des figures 2.11 et 2.12).

---

Figure 2.20: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas K. Le point source n'a pas changé de position par rapport au cas L mais la vitesse de chute est doublée. Les distributions horizontales des particules en suspension sont fort similaires: dans les deux cas, les particules sont advectées vers le NE à un rythme identique. Les particules se déposent toutefois plus rapidement. Après 8 jours, seules 533 des 2000 particules relâchées avant le 5e jour sont encore en suspension.

---

Figure 2.21: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas L. Le point source est situé près de la limite du plateau continental, sur l'isobathe des 100m, à quelques mètres au-dessus du fond. Durant les 4 premiers jours, sous l'action du vent, les particules sont maintenues par un flux vertical à la profondeur du point source pendant qu'elles sont advectées vers le NE. Quelques-unes se déposent cependant tout près du point source. Lorsque le vent est coupé, le mouvement de chute n'est plus contrecarré et les particules se déposent alors sur le plateau.

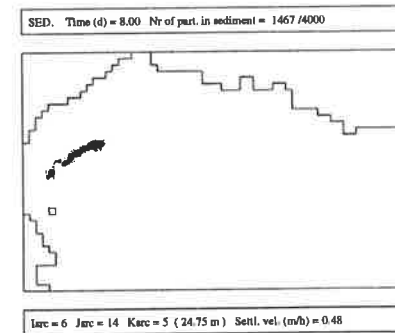
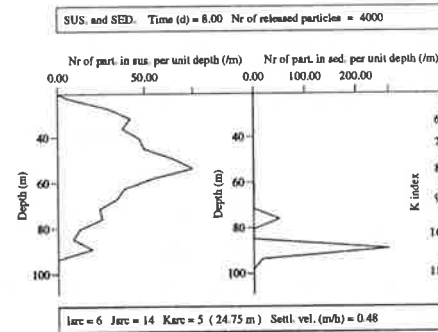
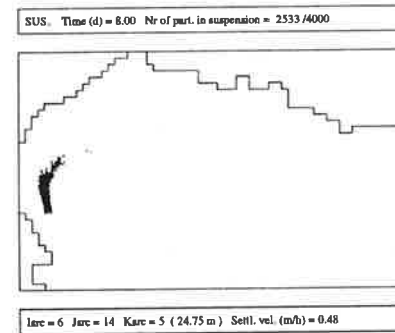
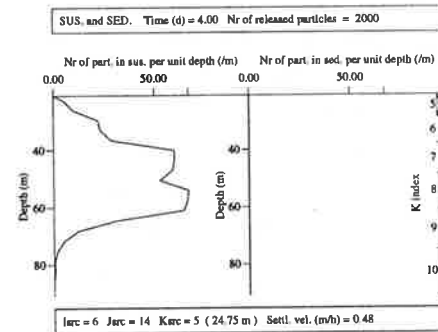
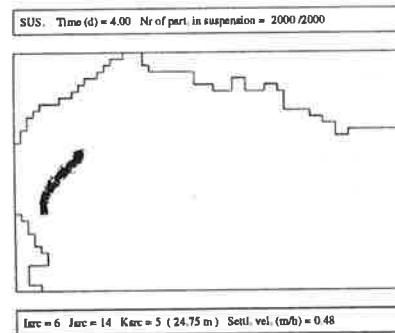
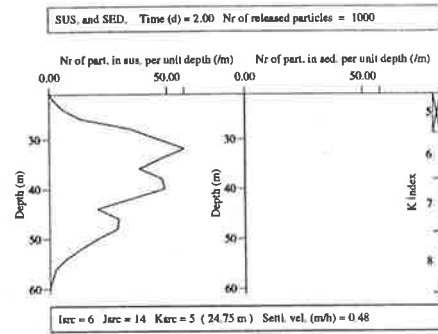
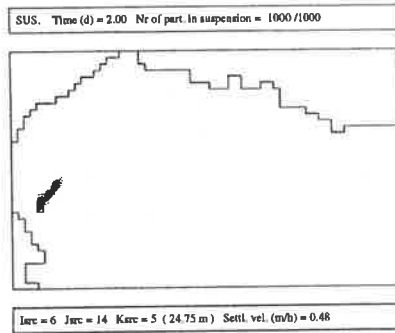


Figure 2.20

## 2.2 Circulation (juillet) par vent du NO

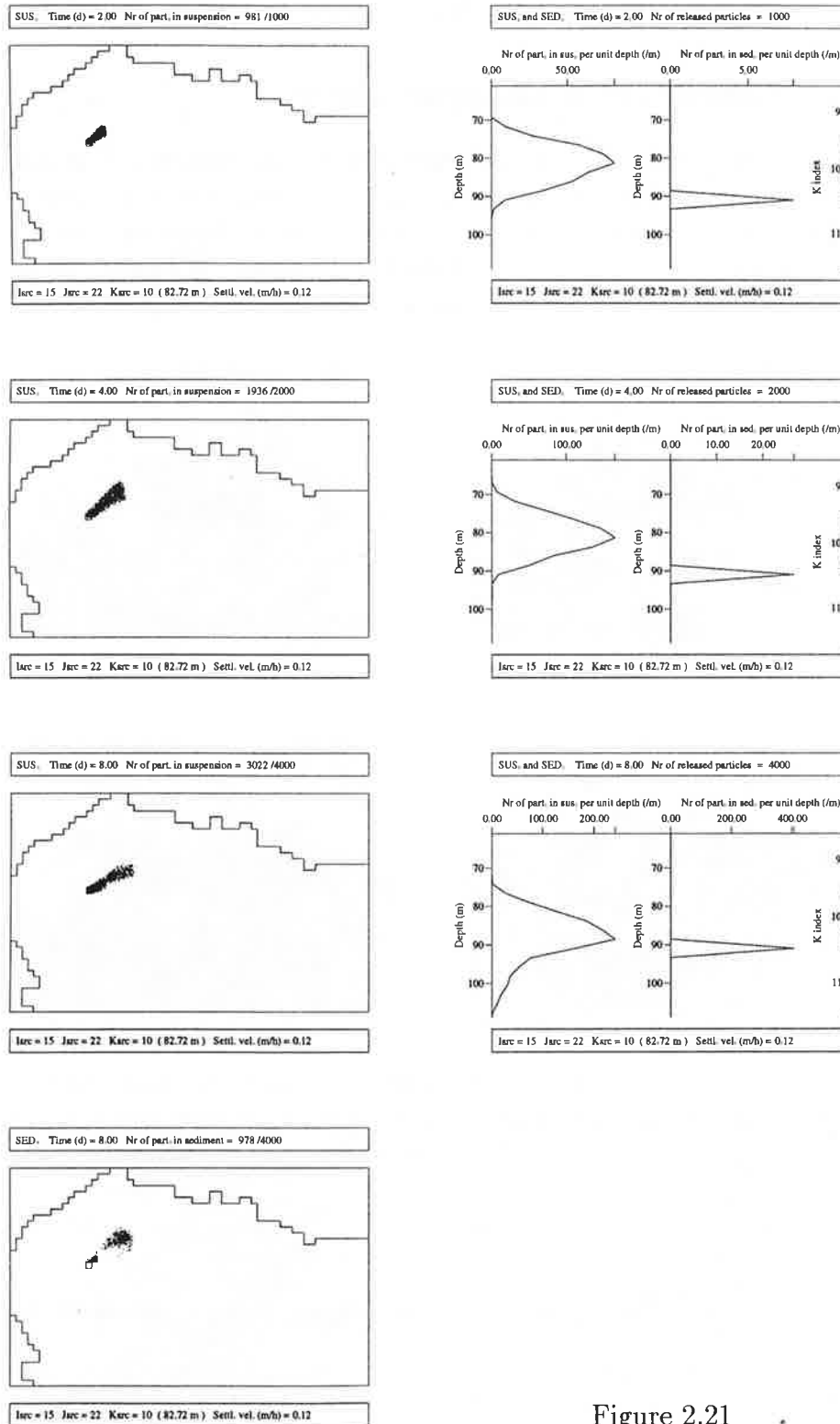


Figure 2.21

## 2.3 Circulation (juillet) par vent variable

### 2.3.1 Simulation hydrodynamique

La simulation hydrodynamique de cette section doit permettre d'analyser les effets induits sur la circulation par les variations spatiales et temporelles du champ de vent. A cette fin, un champ de vent non uniforme et évolutif a été défini. Il a servi de forçage pour une durée de 6 jours. La figure 2.22 montre son évolution de 12 en 12 heures. Le vent souffle du NO pendant 4 jours,

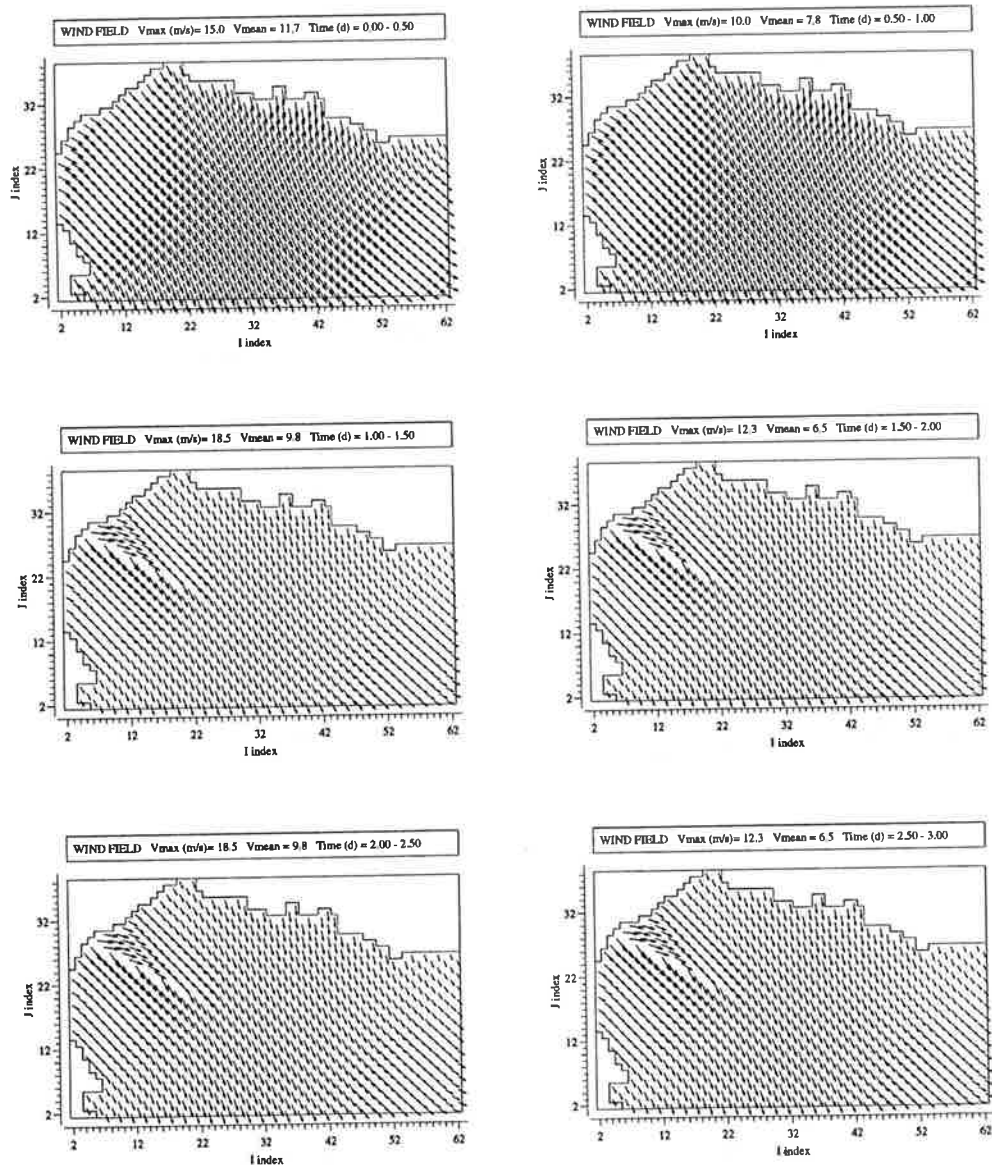


Figure 2.22: début

### 2.3 Circulation (juillet) par vent variable

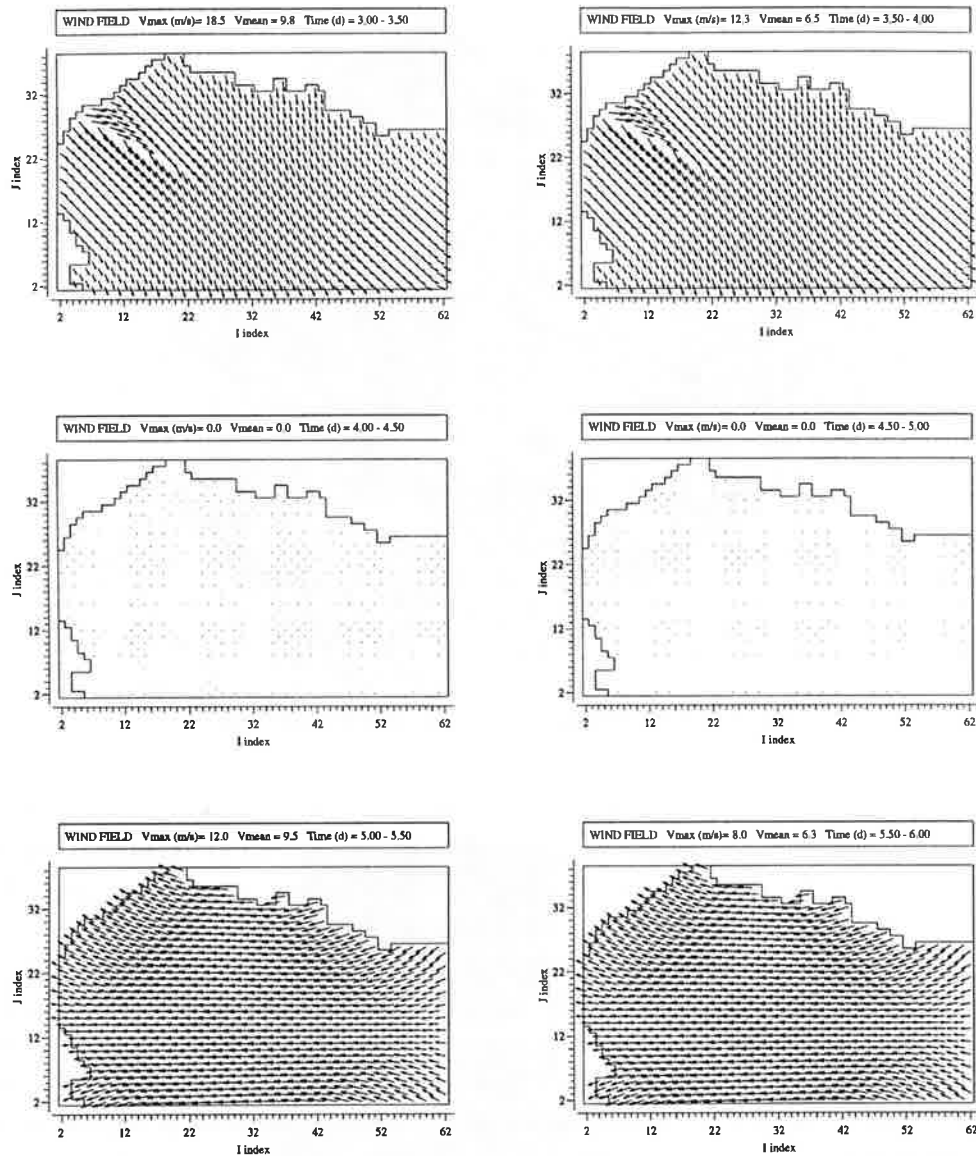


Figure 2.22: suite: évolution du champ de vent de 12 en 12 heures sur la durée de la simulation. Comme pour la représentation des champs de vitesse du fluide, la longueur des vecteurs est ajustée dans chaque figure selon la vitesse maximale.

puis est coupé le 5<sup>e</sup> jour, puis souffle à nouveau, cette fois du secteur E, le 6<sup>e</sup> jour.

Les figures 2.24 à 2.28 visualisent les champs de vitesse et températures à différents instants. Les coupes verticales peuvent être localisées à l'aide de la figure 2.23.

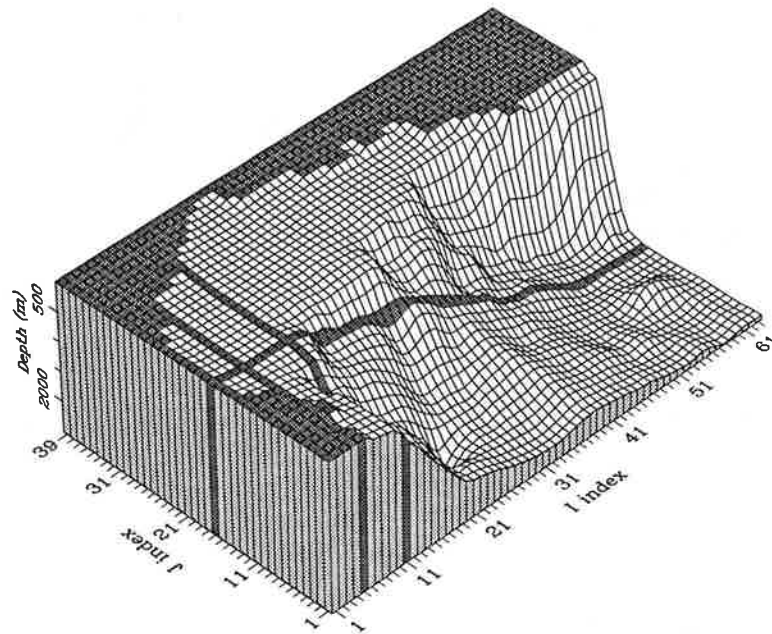


Figure 2.23: Localisation des coupes verticales

Figure 2.24: Coupes horizontales des champs de vitesse et température au temps  $t = 1j$ . Le vent a soufflé du secteur NO durant ce premier jour. En surface ( $K = 1$ ), le champ de vitesse est orienté à  $45^\circ$  sur la droite du vent. Les zones d'upwelling se répartissent tout le long des côtes NO et NE, à l'exception du littoral à l'est du Cap Sicié ( $I = 53$ ). Dans les zones froides, l'écart de température par rapport aux valeurs initiales, est de l'ordre de  $3^\circ C$ . A  $33,3m$ , le courant est orienté au N sur le plateau continental et au SO au-delà de celui-ci. Un downwelling à proximité de la côte SO entraîne en profondeur des eaux plus chaudes.

Figure 2.25: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température au temps  $t = 2,5j$ . Depuis un jour et demi, la Tramontane s'est renforcée à proximité de Valras et souffle en s'évasant. Elle intensifie localement l'upwelling et provoque une extension de la zone froide de surface vers le large (coupe  $K = 1$ ). Le gradient thermique augmente en bordure de cette zone, en particulier au sud. Sous la couche de surface, le contre-courant qui alimente l'upwelling s'est renforcé également (coupe  $K = 6$ ). La coupe S-N en  $I = 5$  permet de le visualiser le long des côtes du Roussillon. Le downwelling est moins intense qu'il ne l'était, dans la même coupe  $I = 5$ , pour la simulation par vent constant et uniforme. On note encore que le contre-courant est alimenté par un flux remontant la pente littorale (coupe  $J = 17$ , pour  $4 \leq I \leq 7$ ).



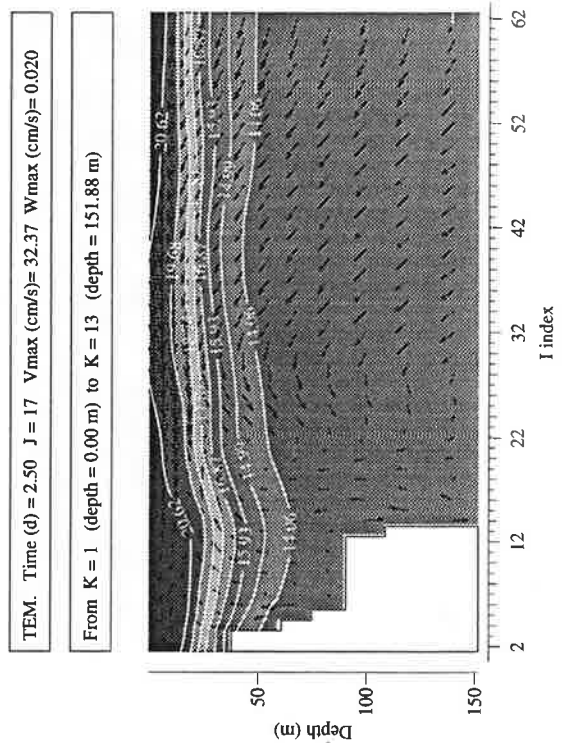
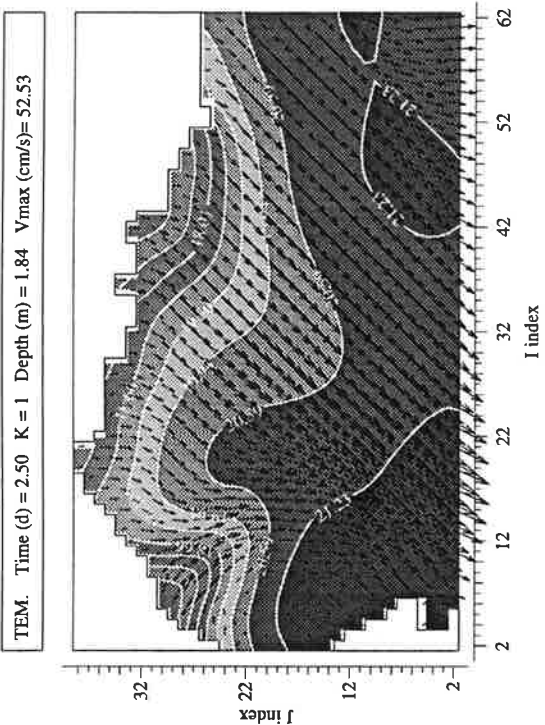
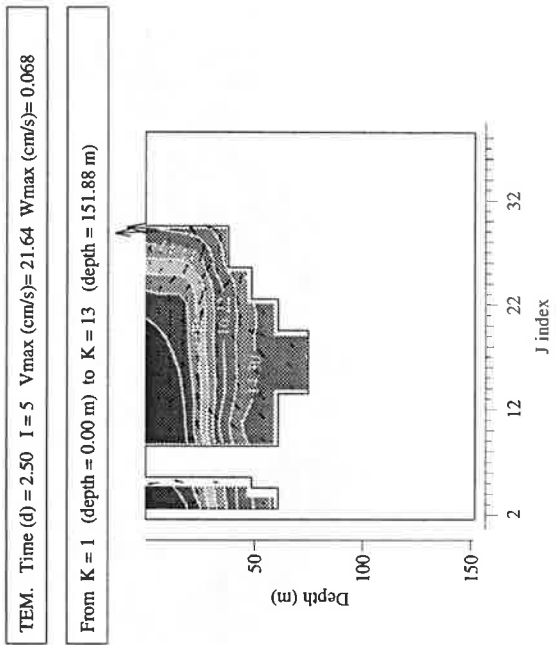
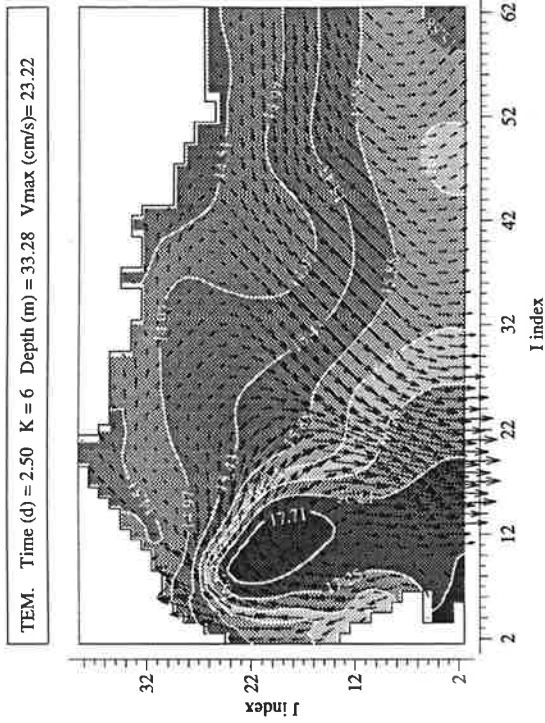


Figure 2.25

### 2.3 Circulation (juillet) par vent variable

---

Figure 2.26: Coupes horizontales des champs de vitesse et température au temps  $t = 3j$ . Durant les 12 dernières heures, la force du vent a été réduite et, avec elle, l'intensité des courants. Le contre-courant côtier se marque toutefois davantage près de la surface où il est dirigé contre le vent (coupes  $K = 1$  et  $K = 2$ ).

---

Figure 2.27: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température au temps  $t = 5j$ , soit un jour après que le vent ait été coupé. Sur le plateau continental, la circulation reste intense, sous l'action des forces de pression barocline, tandis qu'au large, le champ de vitesse tourne à la fréquence d'inertie (coupes  $K = 1$  et  $K = 6$ ). Le champ de vitesse verticale oscille également à la même fréquence (coupe  $J = 17$ ).

---

Figure 2.28: Coupes horizontales des champs de vitesse et température au temps  $t = 6j$ , soit après un jour de vent du secteur E. Le champ de vitesse de surface, orienté au NO, accélère la disparition des traces des upwellings et renforce, sur le plateau continental, la circulation thermohaline encore présente (coupe  $K = 1$ ). Cette circulation de surface génère un downwelling sur la partie septentrionale du littoral, et un courant de retour plus en profondeur (coupe  $K = 6$ ). L'état de la circulation à cette profondeur est encore transitoire et l'on observe, à la limite sud du golfe, un mouvement du fluide vers l'est qui est la trace persistante d'oscillations d'inertie.

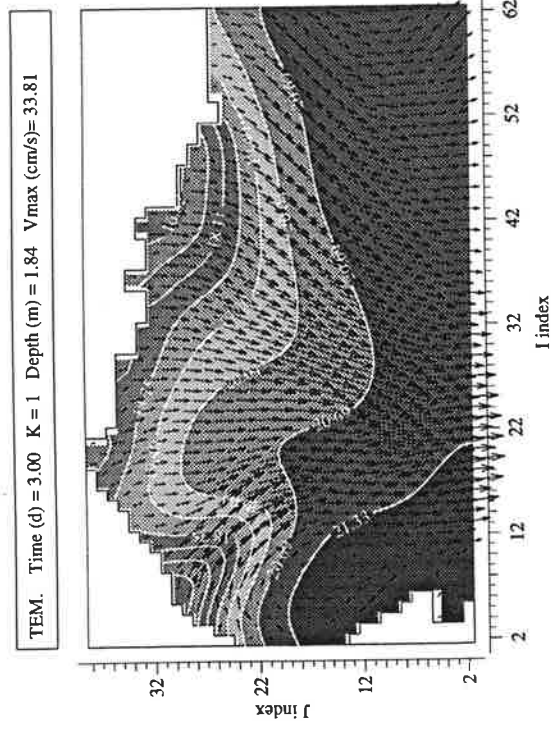
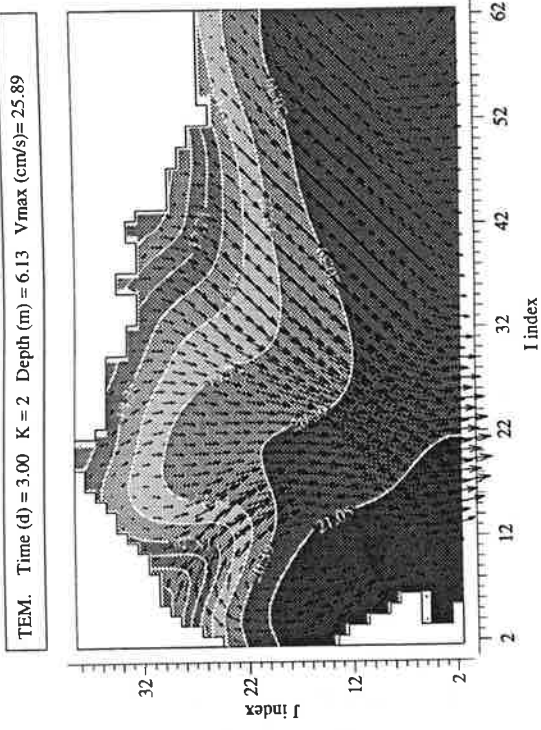
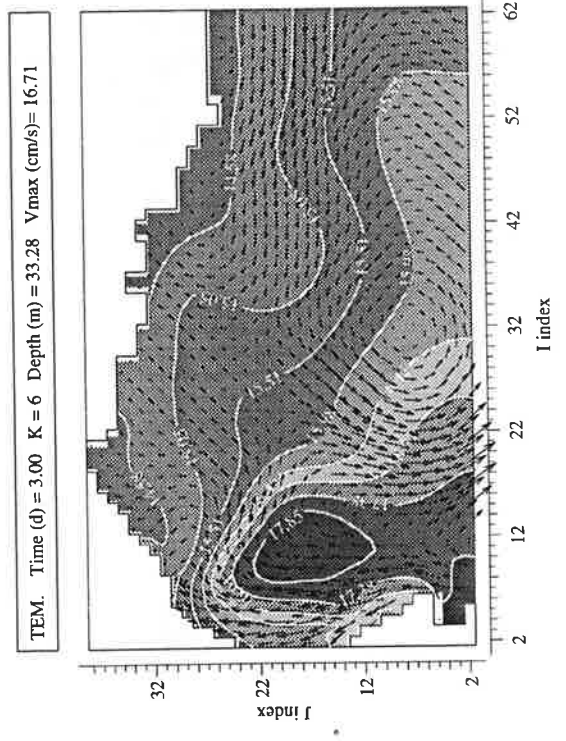


Figure 2.26



### 2.3 Circulation (juillet) par vent variable

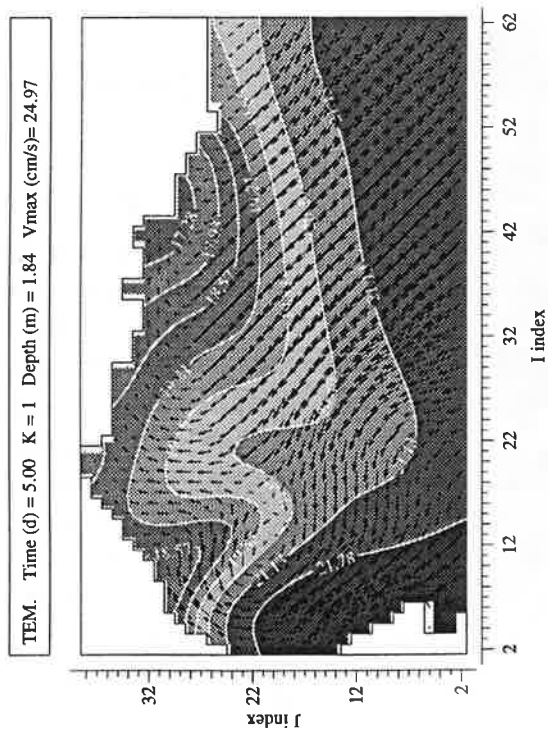
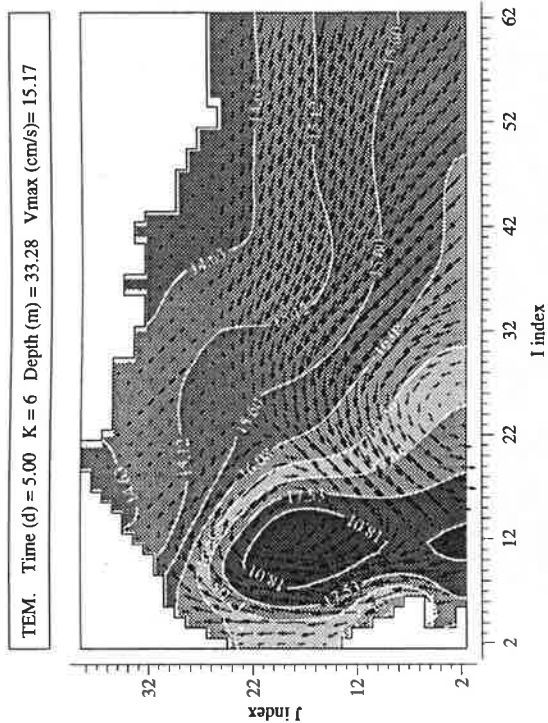
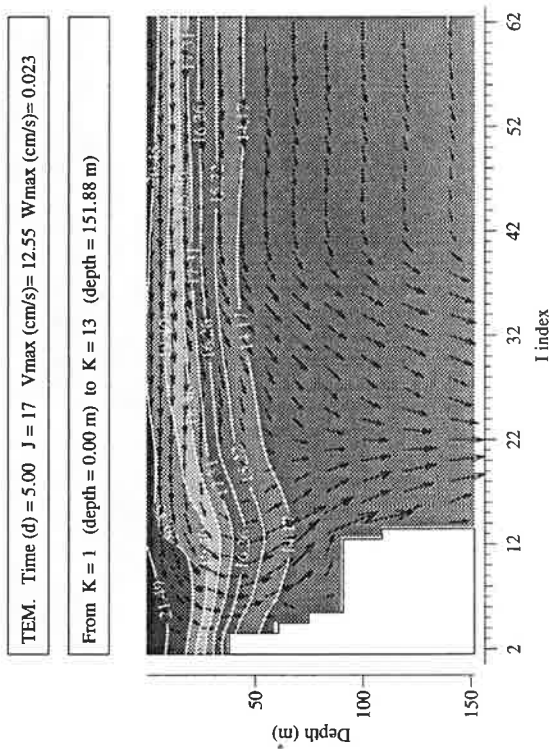


Figure 2.27



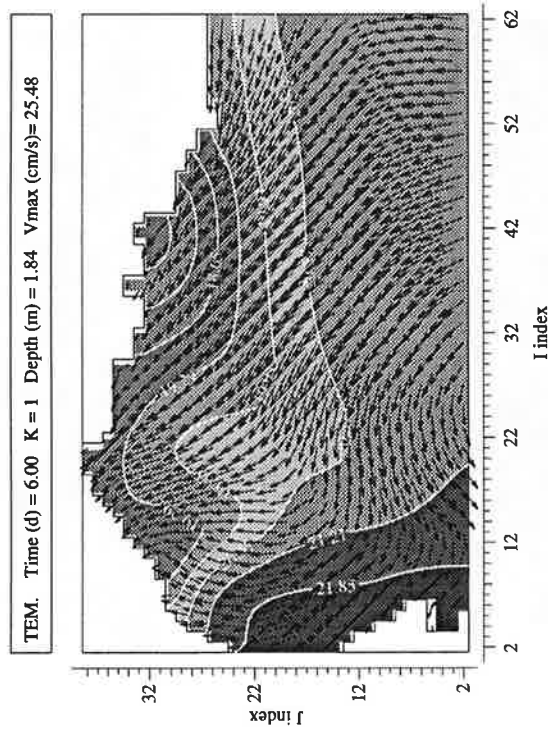
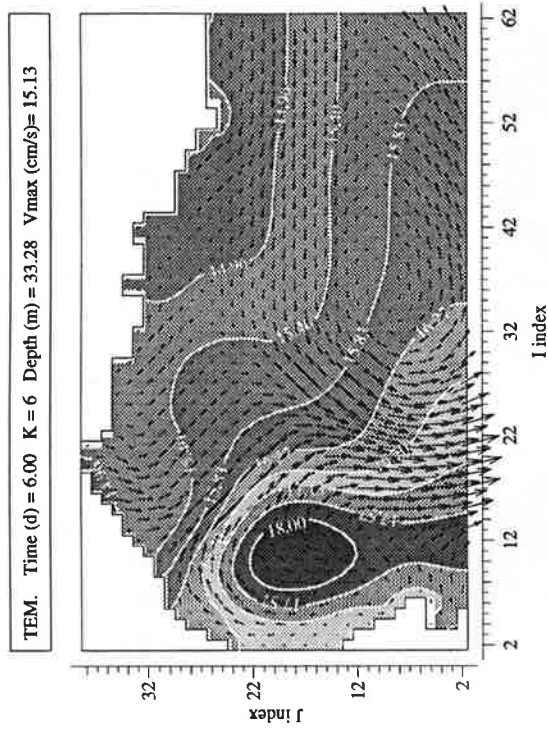


Figure 2.28

### 2.3.2 Oscillations d'inertie

Des courantomètres et thermistors fictifs ont été placés en différents points du domaine. Les figures 2.30–2.32 permettent de suivre l'évolution de la température, de la vitesse horizontale et de la vitesse verticale en 3 points du domaine, à 6, 1m et 33, 3m de profondeur. La figure 2.29 localise ces points.

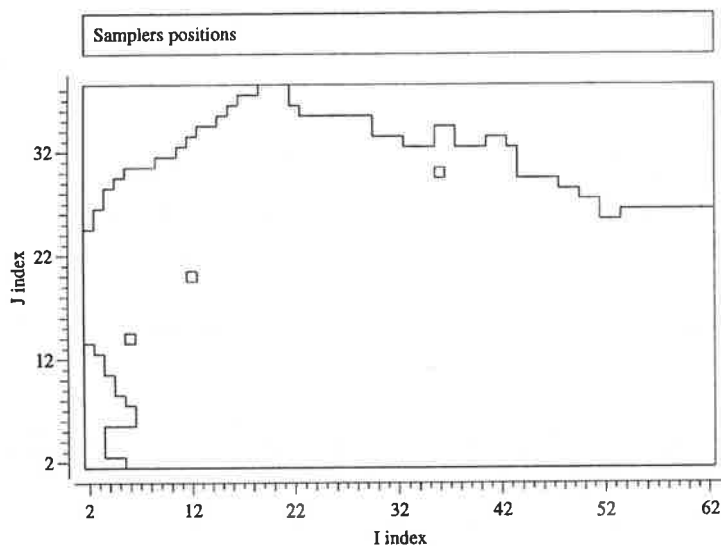


Figure 2.29: Positions des courantomètres et thermistors fictifs.

Figure 2.30: Evolution de la température, des courants et de la vitesse verticale au point (6, 14) à 6m (à gauche) et 33m de profondeur (à droite). Les échelles pour les courbes de température et vitesse verticale sont ajustées selon les valeurs des extrema. Pour les courants, on utilise des stick vector diagrammes dont les valeurs ont été moyennées sur des intervalles de 3h. On observe des oscillations d'inertie dans quasi tous les enregistrements. Elles se superposent à un signal moyen dont l'évolution, plus lente, est régie par le forçage thermique et éolien de l'atmosphère. On note par exemple l'échauffement progressif des couches superficielles du fluide induit par le flux de chaleur atmosphérique. A 33m, le downwelling provoque une élévation de la température durant les 4 premiers jours, à laquelle succède une diminution lorsque le vent est coupé (5e jour) et enfin un état stable le dernier jour, par vent d'est.

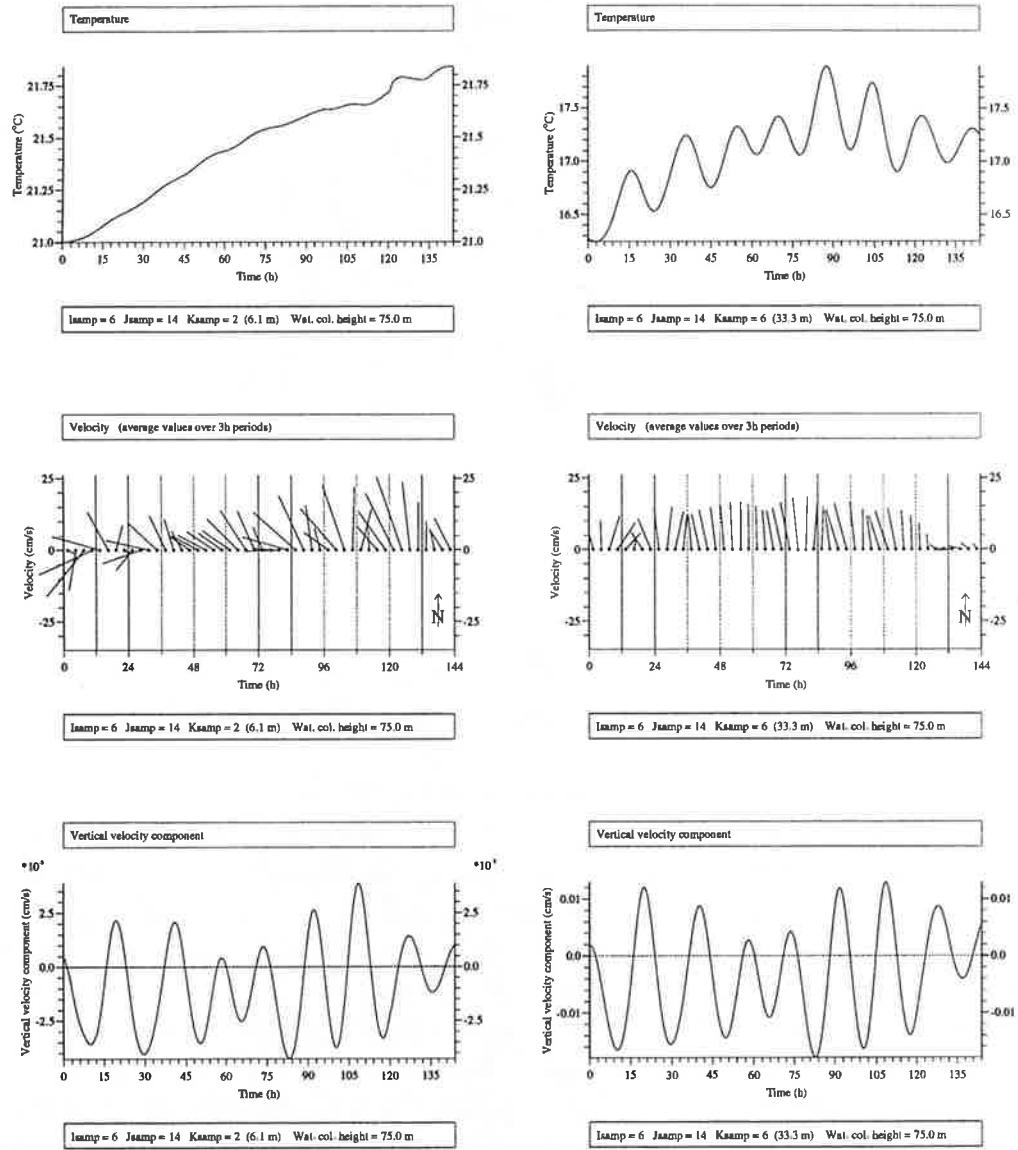


Figure 2.30

### 2.3 Circulation (juillet) par vent variable

---

Figure 2.31: Evolution de la température, des courants et de la vitesse verticale au point (12, 20) à 6m (à gauche) et 33m de profondeur (à droite). Les oscillations d'inertie sont ici aussi bien présentes mais elles interfèrent avec les variations d'intensité du vent qui se produisent toutes les 12 heures. Le point de mesure, situé à quelque 50km des côtes, est au coeur de la circulation du plateau continental. En suivant la courbe de température à 6m, on remarque que durant les deux premiers jours de vent du NO, la température reste stable. A partir du 3e jour, les eaux froides issues de l'upwelling de Valras se rapprochent et la température diminue alors. Le vent est coupé au 5e jour puis souffle à nouveau, mais du secteur E, le 6e jour. Les courants s'orientent alors au N et ramènent des eaux plus chaudes. A 33m, le courant est orienté au NE durant l'épisode de vent du NO et on enregistre le réchauffement induit par l'advection des eaux plus chaudes provenant du SO.

---

Figure 2.32: Evolution de la température, des courants et de la vitesse verticale au point (36, 30) à 6m (à gauche) et 33m de profondeur (à droite). Ce point est situé dans une zone d'upwelling par vent de NO et de downwelling par vent d'E. Cela se manifeste dans les enregistrements par des vitesses verticales à 6m et 33m qui sont en phase et dont le signe de la valeur moyenne correspond à un mouvement ascendant ou descendant. On note aussi que les oscillations d'inertie peuvent provoquer un renversement momentané du mouvement vertical. L'enregistrement de température montre les refroidissement et réchauffement accompagnant upwelling et downwelling.

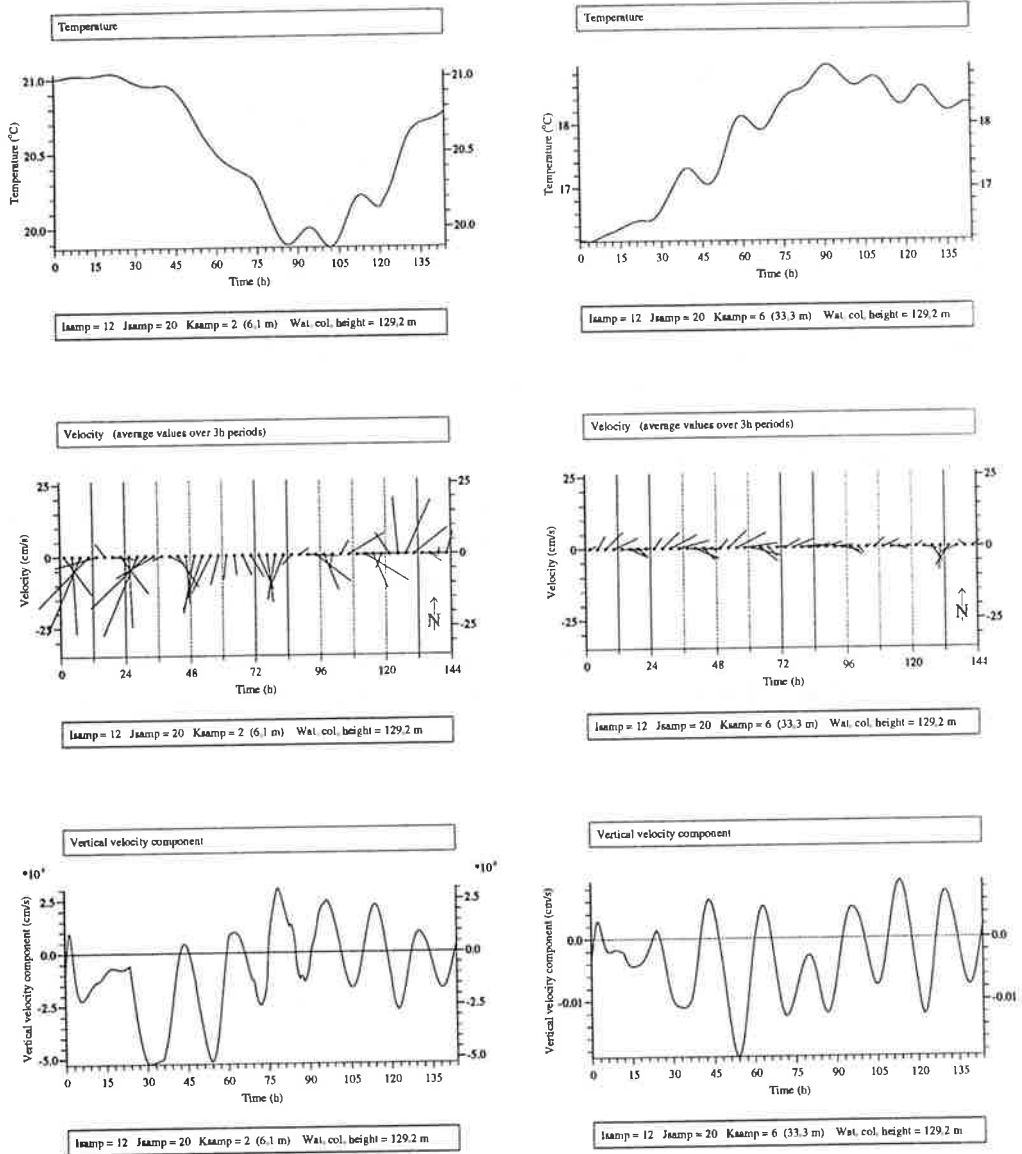


Figure 2.31

### 2.3 Circulation (juillet) par vent variable

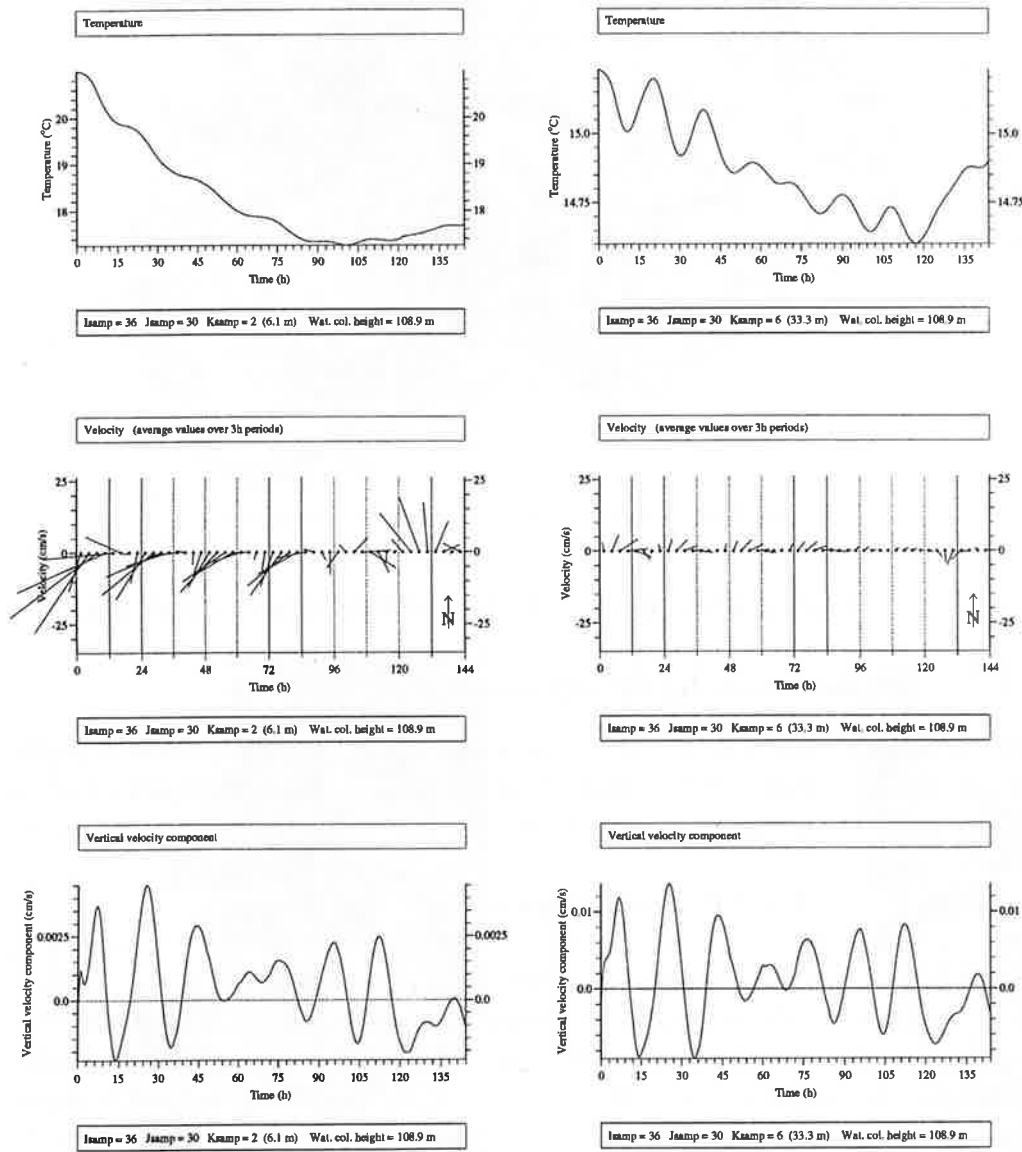


Figure 2.32

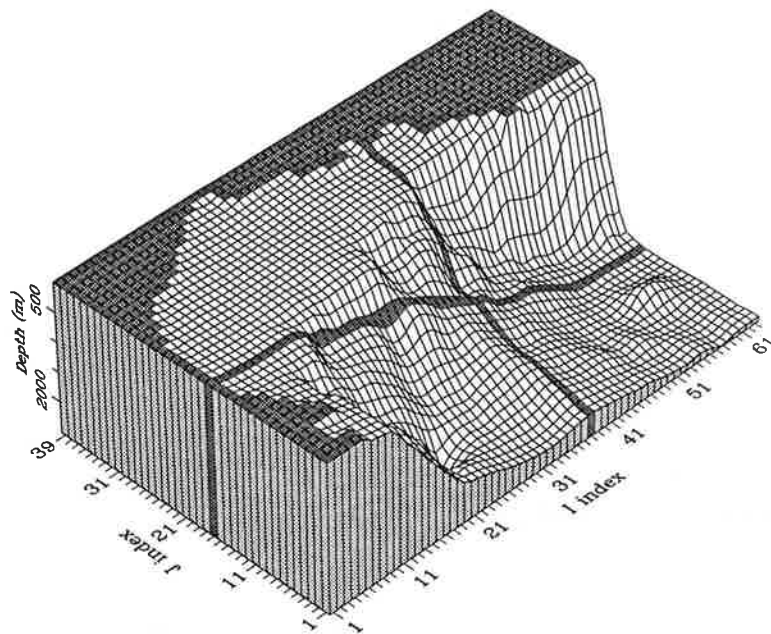


Figure 2.33: Localisation des coupes verticales

## 2.4 Circulation moyenne hivernale (février)

### 2.4.1 Simulation hydrodynamique

Une simulation analogue à celle de la section 2.1.1 a été effectuée à partir des conditions initiales correspondant aux données climatiques du mois de février. Cette simulation couvre une durée de 12 heures, sans forçage de vent.

Les figures 2.33 à 2.35 illustrent les résultats obtenus.

Figure 2.34: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse, température et salinité. En surface, la température varie entre  $10,8^{\circ}\text{C}$  et  $13,2^{\circ}\text{C}$ . Les eaux les plus chaudes arrivent du bassin ligurien, tandis que les plus froides se trouvent le long des côtes NO, en particulier près de Valras. Sauf à proximité du Rhône, le champ de salinité présente une structure fort proche de celle du champ de température: les gradients les plus forts sont sur le plateau continental et ils y ont la même direction, plus ou moins parallèle à la ligne de pente. Température et salinité sont quasi homogènes sur les 100 premiers mètres de la colonne d'eau (coupe  $J = 17$ ). Le courant LP traverse le Golfe du Lion de part en part, en longeant la pente continentale (coupes  $K = 1$ ,  $K = 22$ ). A partir de  $1500\text{m}$  environ, on ne distingue plus d'orientation précise du courant et les vitesses sont faibles (moins de  $1\text{cm/s}$  en moyenne).

2.4 Circulation moyenne hivernale (février)

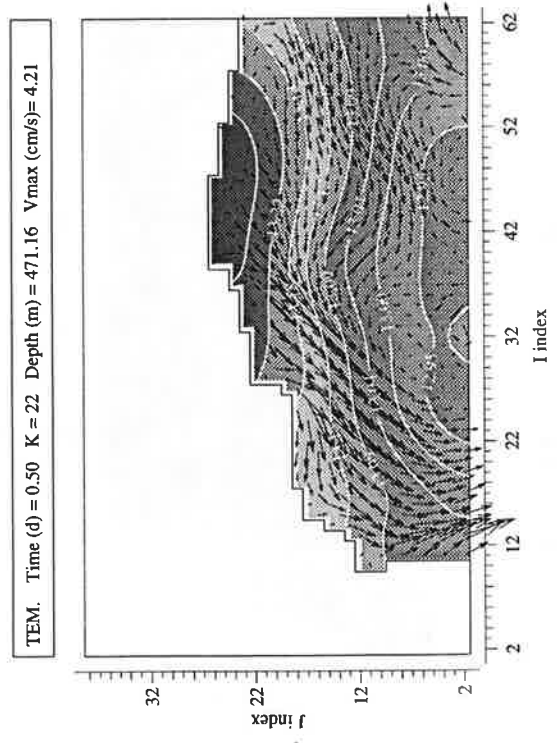
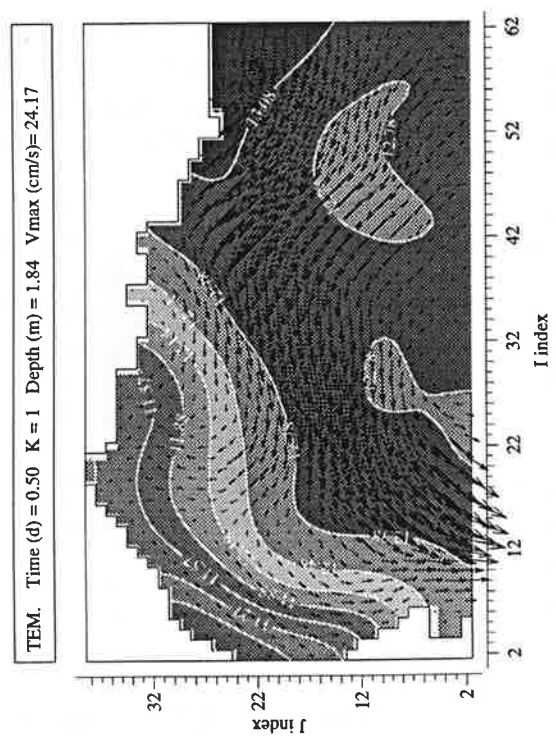
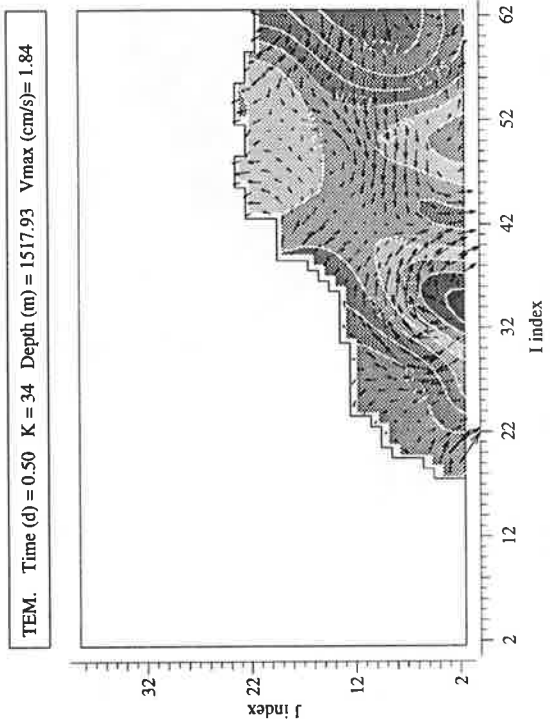
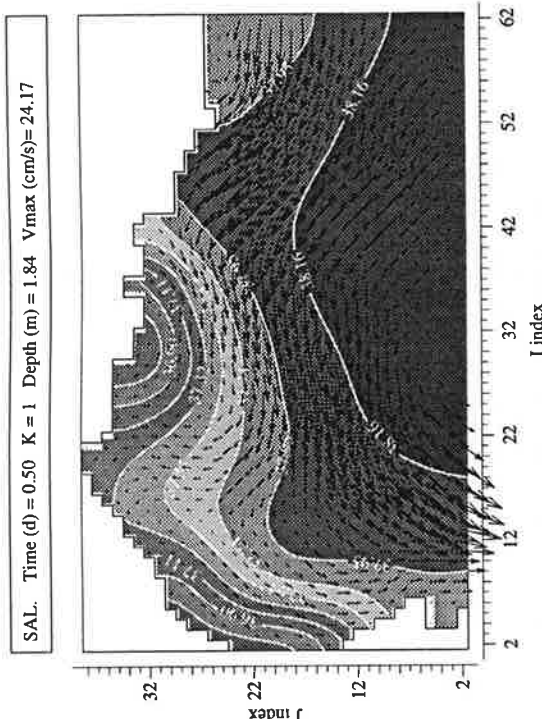


Figure 2.34: début

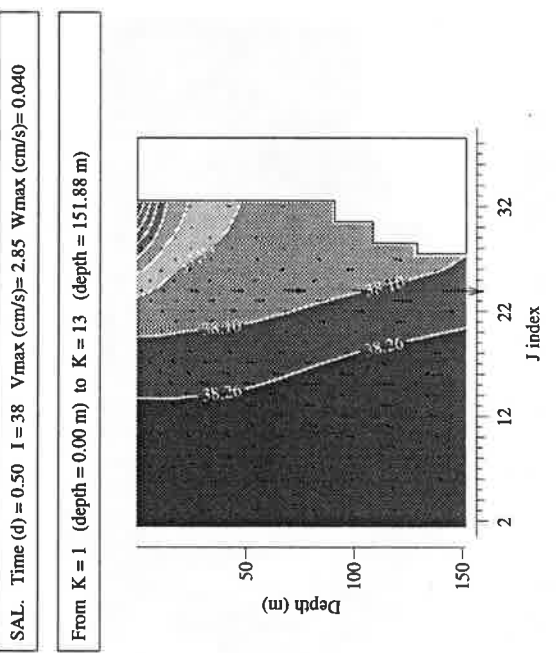
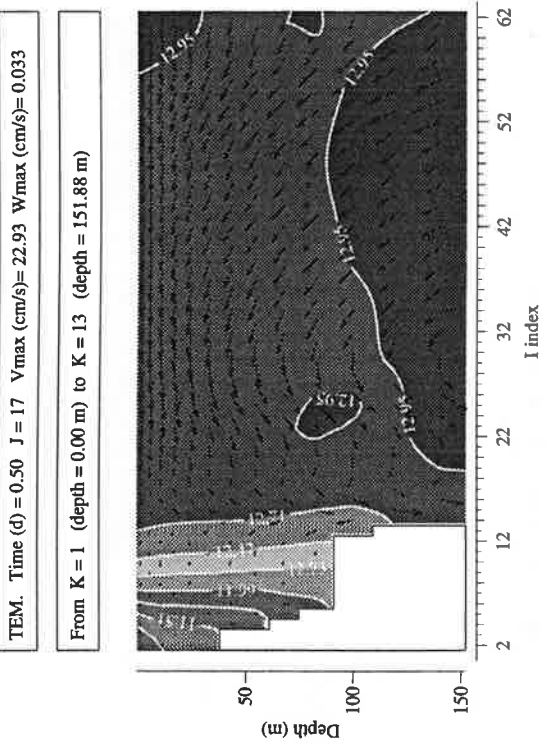
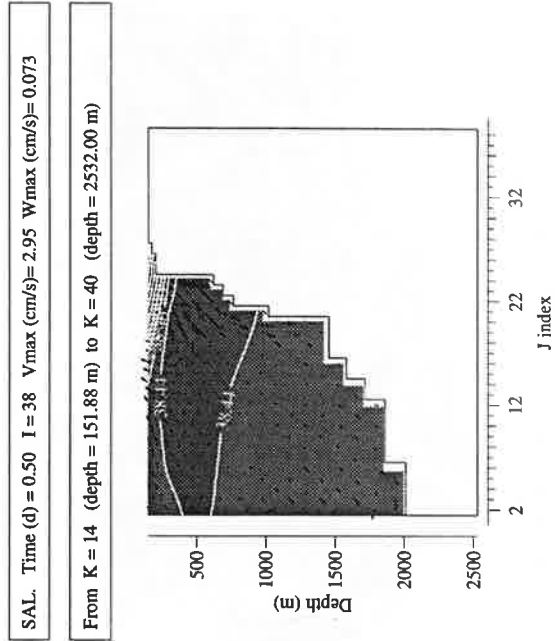
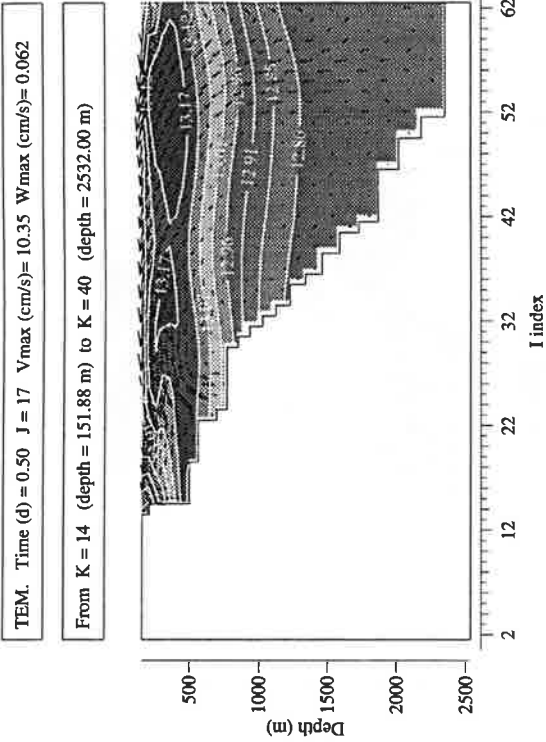


Figure 2.34: fin

## 2.4 Circulation moyenne hivernale (février)

SURF. PRESSURE Time (d.hh) = 0.12 Zmin (cm) = -6.62 Zmax (cm) = 5.04

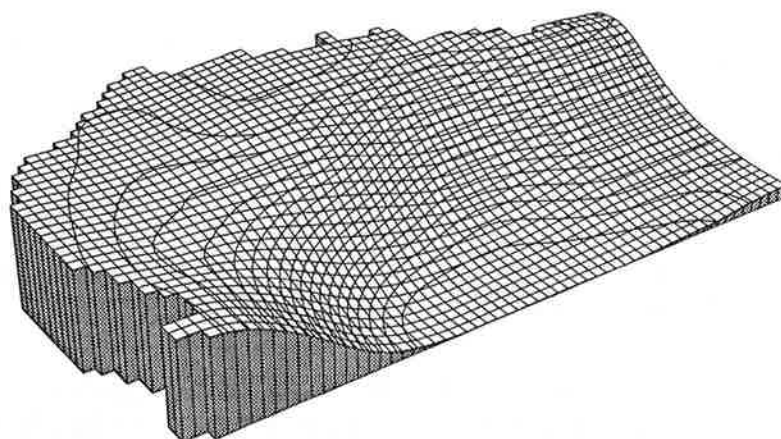


Figure 2.35

Figure 2.35: Champ de pression de surface. Par rapport au champ de pression obtenu dans la simulation estivale analogue, on note la disparition du dôme qui accompagnait le tourbillon anticyclonique. La dépression associée au courant LP est cependant plus marquée.

### 2.4.2 Transport de particules

Calculées pour une période de 90 jours sur la base du champ de vitesse obtenu ci-dessus, les trajectoires de particules relâchées en trois points sources font l'objet des figures qui suivent. Ces points sources sont les mêmes que ceux considérés pour la simulation analogue en période estivale.

<i>cas</i>	$(I, J, K)_{src}$	<i>débit</i>	<i>vit. de chute</i>	$\Delta h/10j$	<i>dens. <math>d_0</math></i>	<i>figure</i>
M	(35, 28, 1)	$100 j^{-1}$	0,04 m/h	9,6 m	$104,2 m^{-1}$	2.36
N	(6, 14, 1)	$100 j^{-1}$	0,08 m/h	19,2 m	$52,1 m^{-1}$	2.37
O	(61, 18, 1)	$100 j^{-1}$	0,00 m/h	0 m	$\infty m^{-1}$	2.38

Tableau 2.3: Tableau synoptique des différents paramètres pour le calcul du transport des particules.

Trois cas, désignés cas M, N et O, ont été retenus. Ils correspondent respectivement aux cas A, C et F. Le tableau 2.3 rappelle pour chacun d'eux les différentes caractéristiques.

---

Figure 2.36: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas M. Les particules sont advectées vers l'ouest par les courants de surface et s'enfoncent progressivement dans la colonne d'eau. Elles bifurquent ensuite vers le S-SO et poursuivent leur cheminement vers le large. Après avoir dépassé la limite du plateau, elles sont alors entraînées par le courant LP le long de la pente continentale où leur mouvement de chute est fortement accéléré par le fluide. Quelque 800 particules se sont déposées sur la partie supérieure de la pente, entre 100m et 250m de profondeur.

---

Figure 2.37: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas N. Les particules relâchées dans la partie SO du plateau continental sont emportées vers le S le long du littoral et rejoignent le courant LP qui les entraîne au-delà des limites du Golfe du Lion.

---

Figure 2.38: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas O. La vitesse de chute des particules est nulle et les trajectoires décrivent donc le mouvement de particules du fluide. Issues d'un point situé dans le courant LP, ces trajectoires s'infléchissent vers le N et, après 30 jours, les particules se retrouvent à proximité du point source des particules considérées dans le cas N. Certaines d'entre elles suivent alors un cheminement identique, rejoignant au sud le courant LP (figure 90h) tandis que d'autres bifurquent vers le NO.

## 2.4 Circulation moyenne hivernale (février)

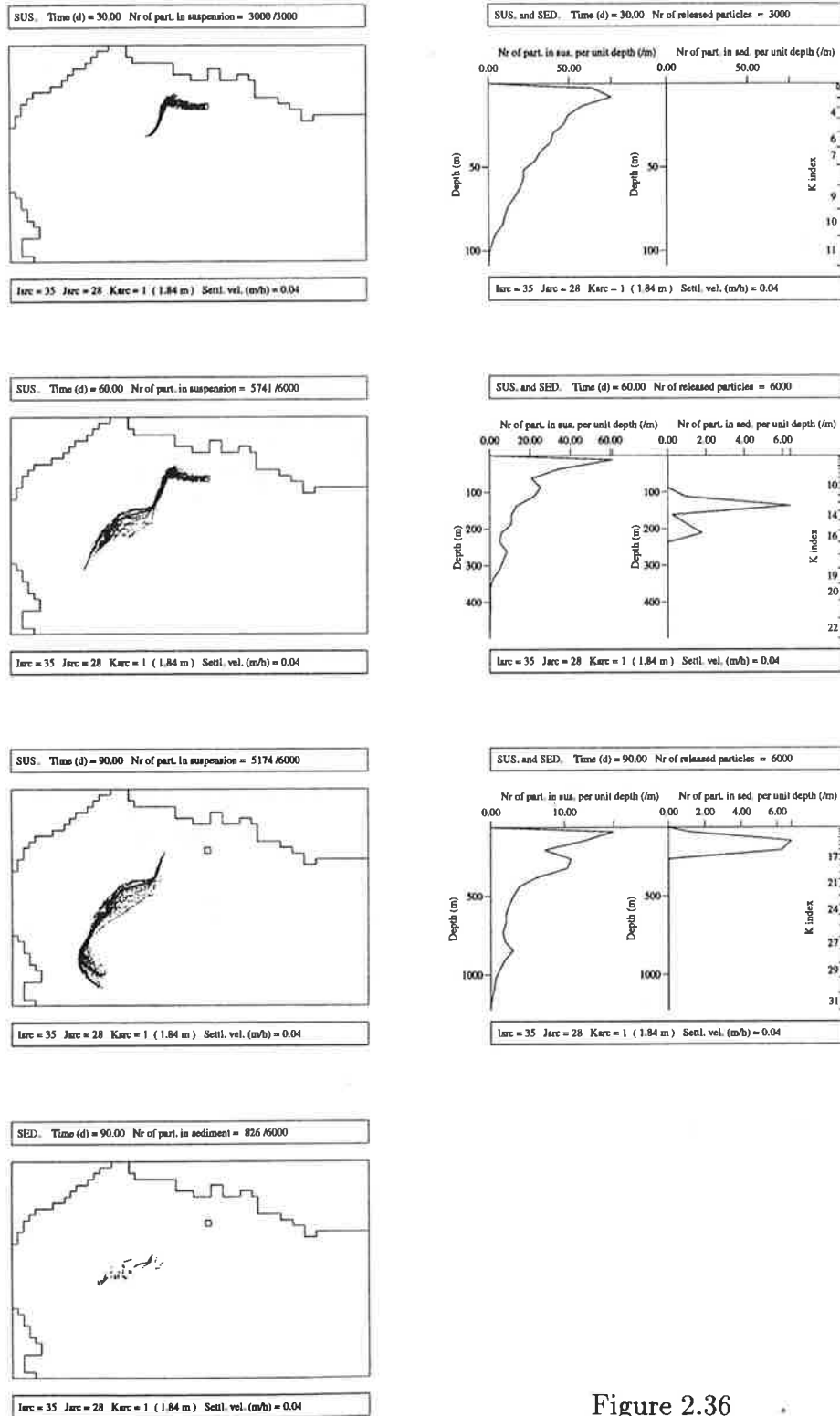


Figure 2.36

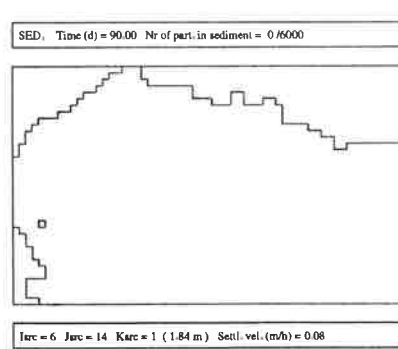
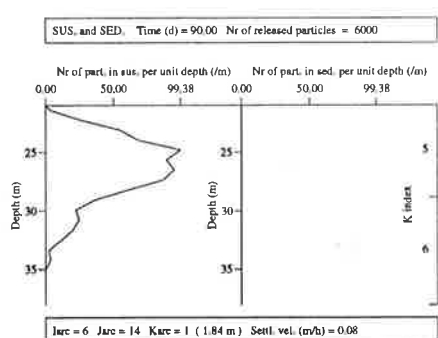
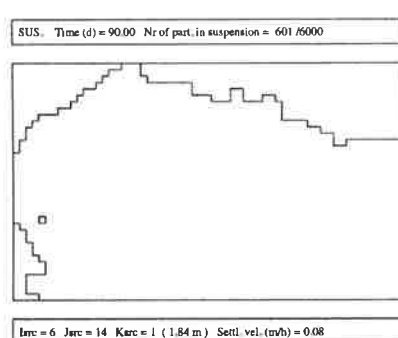
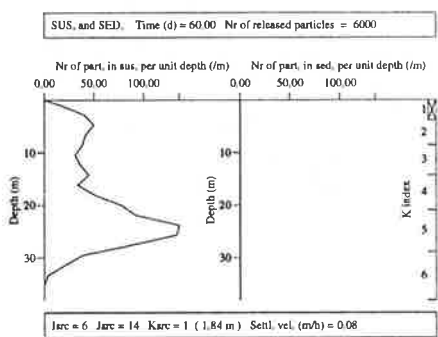
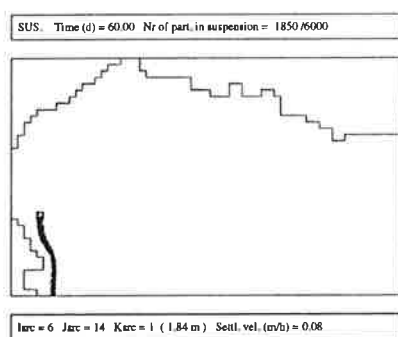
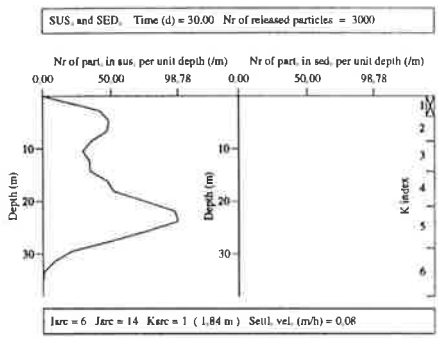
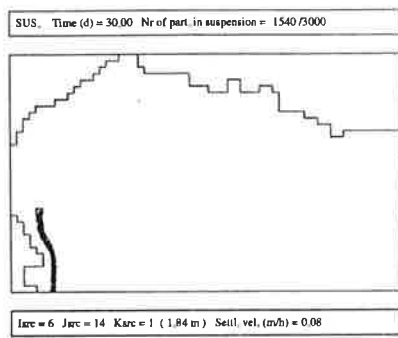


Figure 2.37

## 2.4 Circulation moyenne hivernale (février)

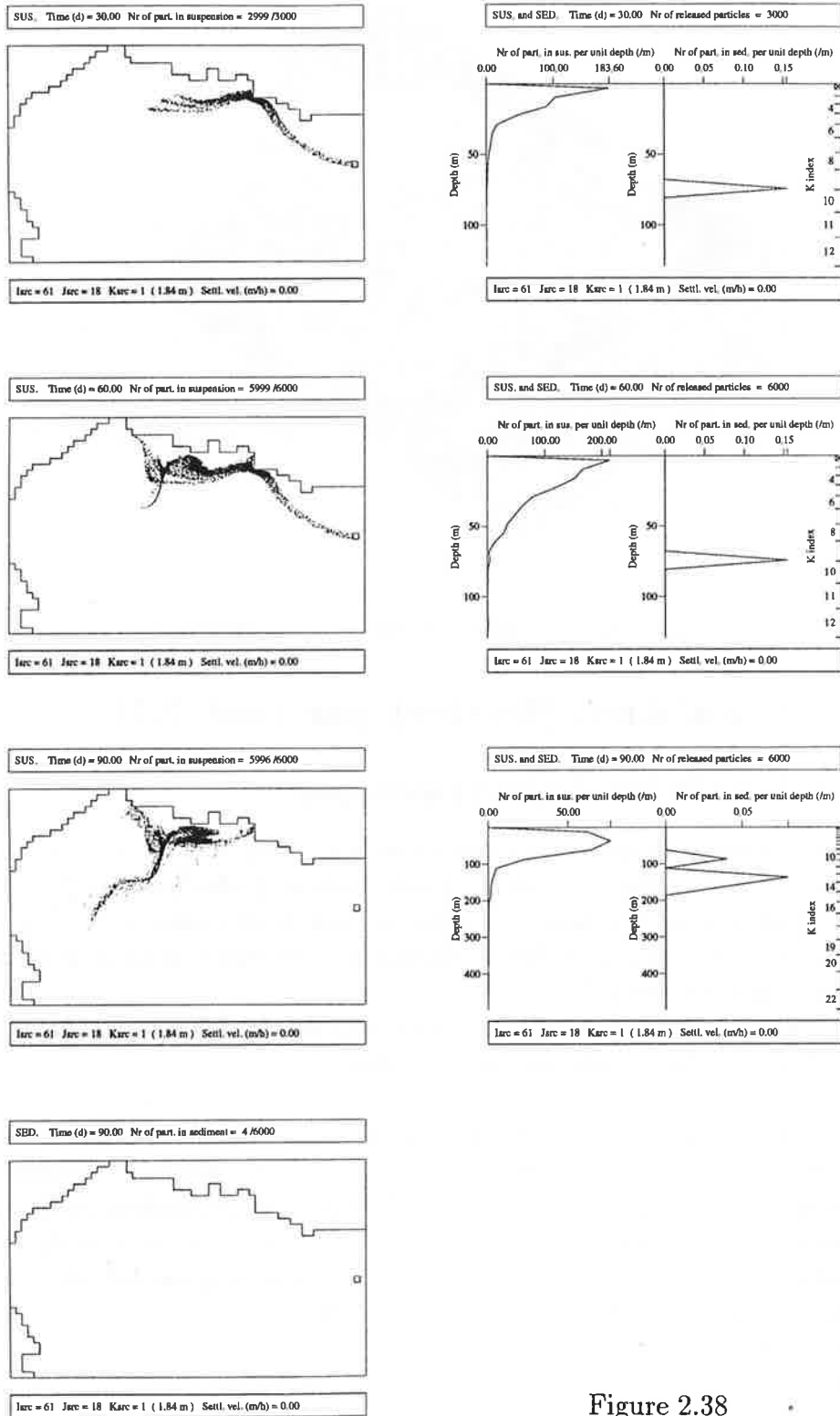


Figure 2.38

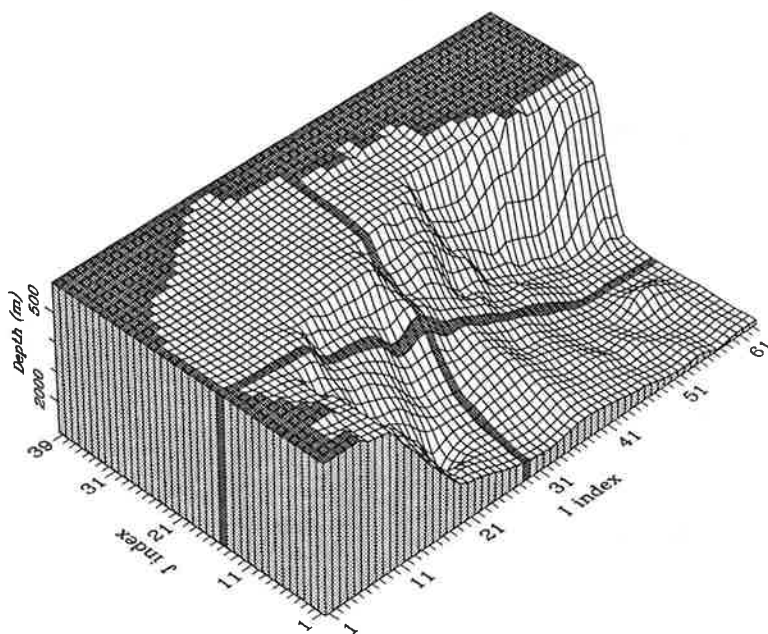


Figure 2.39: Localisation des coupes verticales

## 2.5 Simulation (février) par vent NO

### 2.5.1 Simulation hydrodynamique

Afin de pouvoir comparer situations estivale et hivernale, des conditions de vent analogues à celles de la simulation du mois de juillet (section 2.2.1) ont été utilisées pour la simulation qui suit. Le vent souffle donc du secteur NO ( $330^\circ$ ) à vitesse constante ( $15\text{m/s}$ ) durant 4 jours puis s'apaise pour les 4 jours suivants (vitesse nulle).

Les figures 2.40 à 2.43 qui suivent pourront être comparées aux figures 2.11 à 2.15 de la simulation estivale correspondante.

---

Figure 2.40: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température au temps  $t = 1j$ . Sous l'action du vent, le courant est orienté est orienté au S-SO en surface (coupe  $K = 1$ ). A  $33\text{m}$  de profondeur, une partie du courant est orienté au NE sur le plateau continental (coupe  $K = 6$ ). Cette circulation s'accompagne de mouvements de downwelling sur les côtes SO et d'upwelling sur tout le littoral N (coupe  $I = 29$ ).

---

Figure 2.41: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse, température et salinité au temps  $t = 4j$ . En 3 jours, les mouvements d'advection

## 2.5 Simulation (février) par vent NO

---

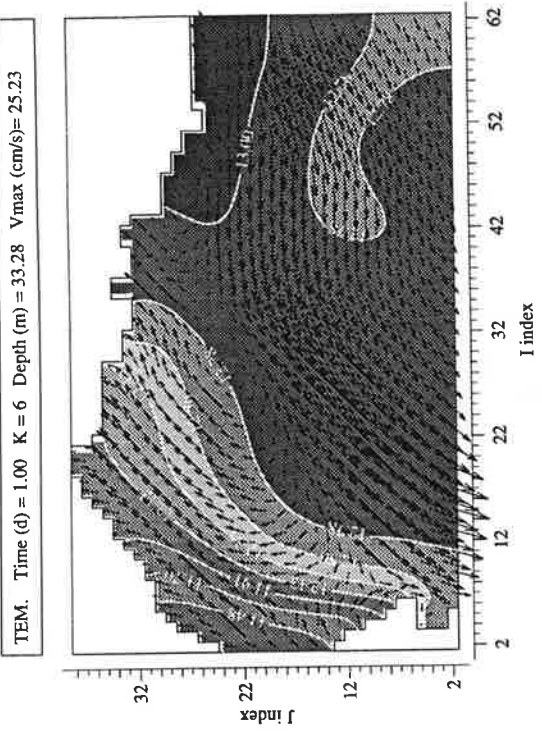
et de mélange ont provoqué une élévation de la température de surface sur le plateau continental, surtout à l'ouest (coupe  $K = 1$ ). L'upwelling du littoral nord continue d'advecter des eaux plus chaudes et plus salées vers la surface (coupe  $I = 29$ ).

---

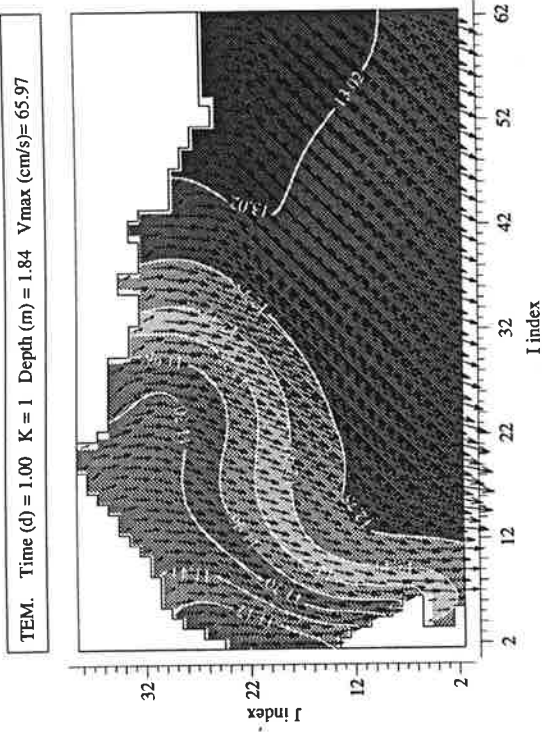
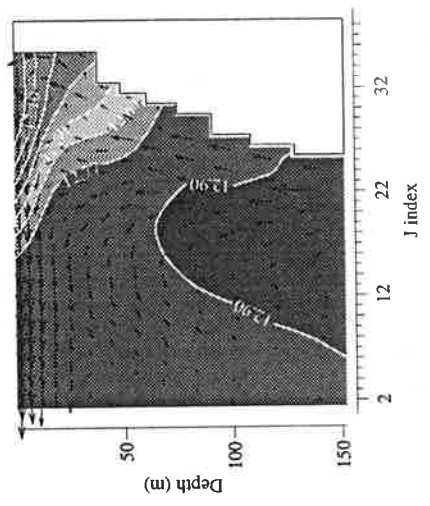
Figure 2.42: Champ de pression de surface après 4 jours de vent du NO. Il présente un aspect proche de celui observé en situation estivale mais la pente de la surface est plus faible.

---

Figure 2.43: Champs de vitesse et température en surface aux temps  $t = 5j$  et  $t = 7j$ . Le vent a été coupé à la fin du 4e jour et, depuis, le champ de vitesse des couches superficielles décrit un mouvement de rotation. L'amplitude des vitesses reste importante au large mais diminue par contre fortement sur le plateau.



TEM. Time (d) = 1.00 I = 29 Vmax (cm/s) = 55.50 Wmax (cm/s) = 0.049  
 From K = 1 (depth = 0.00 m) to K = 13 (depth = 151.88 m)



TEM. Time (d) = 1.00 J = 15 Vmax (cm/s) = 40.79 Wmax (cm/s) = 0.042  
 From K = 1 (depth = 0.00 m) to K = 13 (depth = 151.88 m)

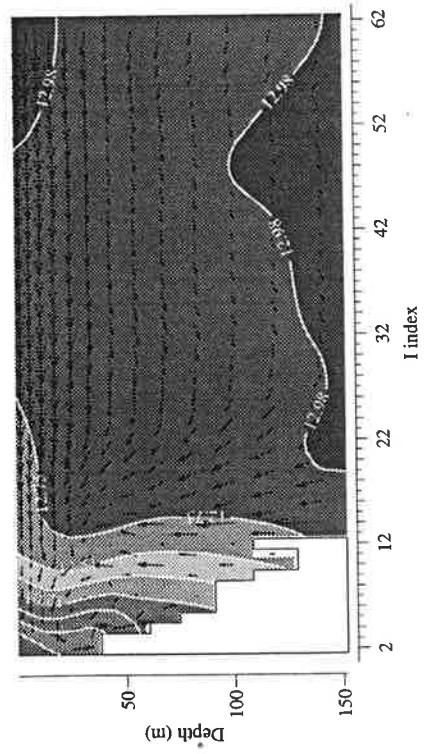


Figure 2.40

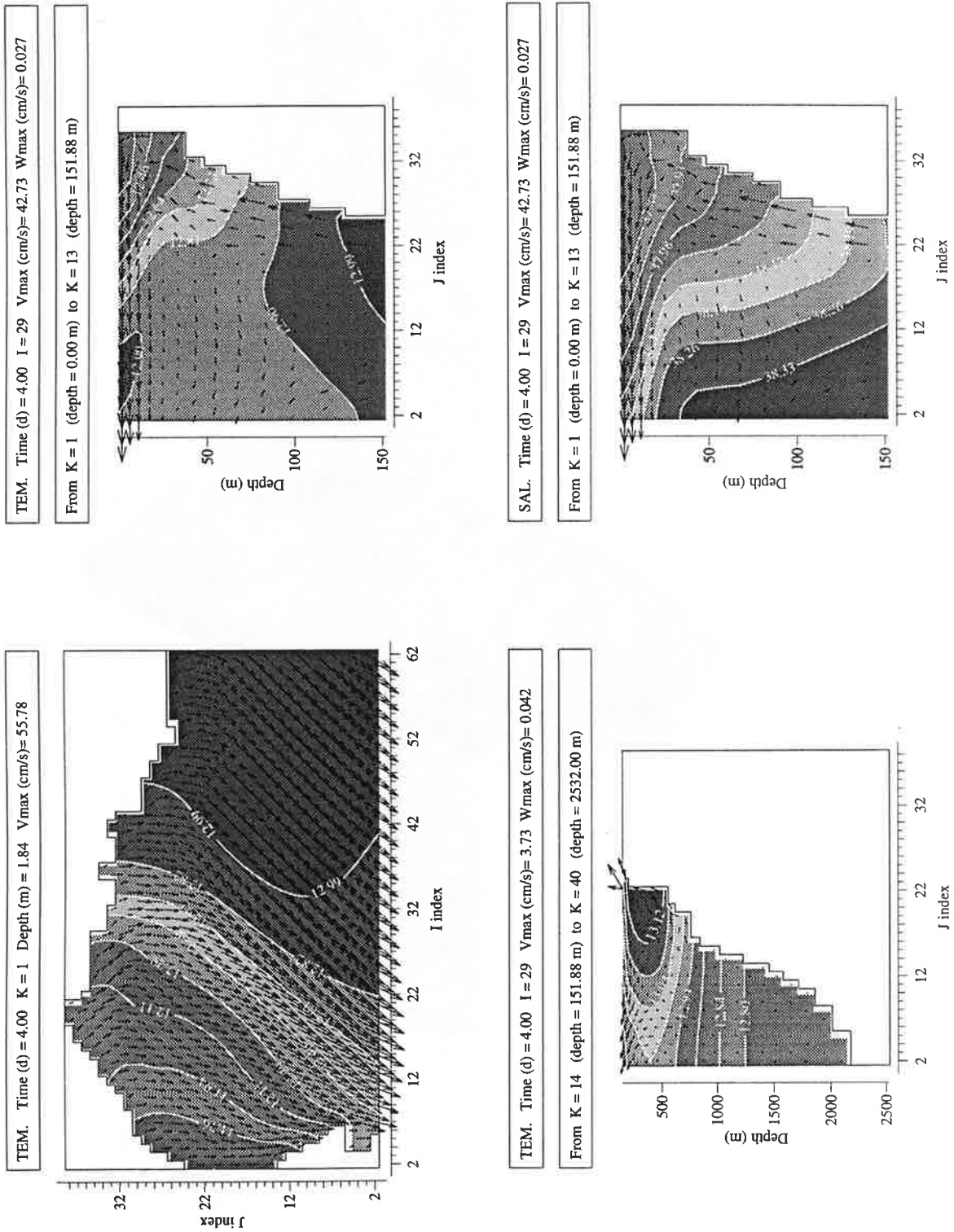


Figure 2.41

SURF. PRESSURE Time (d.hh) = 4.00 Zmin (cm) = -7.67 Zmax (cm) = 4.21

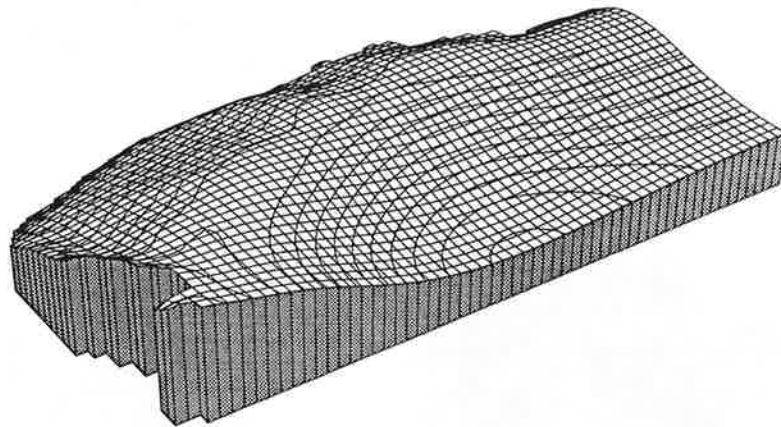


Figure 2.42



## 2.5.2 Transport de particules

Avec les champs de vitesse obtenus ci-dessus, les trajectoires de particules ont été calculées pour 4 cas. Ceux-ci sont précisés dans le tableau 2.4.

<i>cas</i>	$(I, J, K)_{src}$	<i>débit</i>	<i>vit. de chute</i>	$\Delta h/10j$	<i>dens. <math>d_0</math></i>	<i>figure</i>
P	(35, 30, 1)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.44
Q	(35, 30, 9)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.45
R	(6, 14, 5)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.46
S	(15, 22, 10)	$500 j^{-1}$	0,12 m/h	28,8 m	$173,6 m^{-1}$	2.47

Tableau 2.4: Tableau synoptique des différents paramètres pour le calcul du transport des particules.

Figure 2.44: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas P. Dès qu'elles sont relâchées, les particules sont transportées rapidement par le courant dans un mouvement au S-SO, s'infléchissant sur la droite au fur et à mesure de la chute des particules. A partir du 5e jour le vent cesse de souffler et les particules sont alors entraînées par le courant LP.

Figure 2.45: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas Q. Le point source est situé à la base d'une zone d'upwelling. Durant les deux premiers jours où souffle le vent, les particules sont globalement maintenues dans la colonne d'eau à hauteur du point source. quelques particules remontent au-delà de 50m. Durant les deux jours qui suivent, le mouvement d'upwelling s'intensifie et une part plus importante des particules remontent la colonne d'eau. Certaines d'entre elles atteignent la surface. Lorsque le vent est coupé, les particules reprennent leur mouvement de chute naturelle et se déposent sur la pente littorale. Le pic de densité observé dans la distribution verticale de la figure 8v correspond aux particules relâchées depuis lors.

## 2.5 Simulation (février) par vent NO

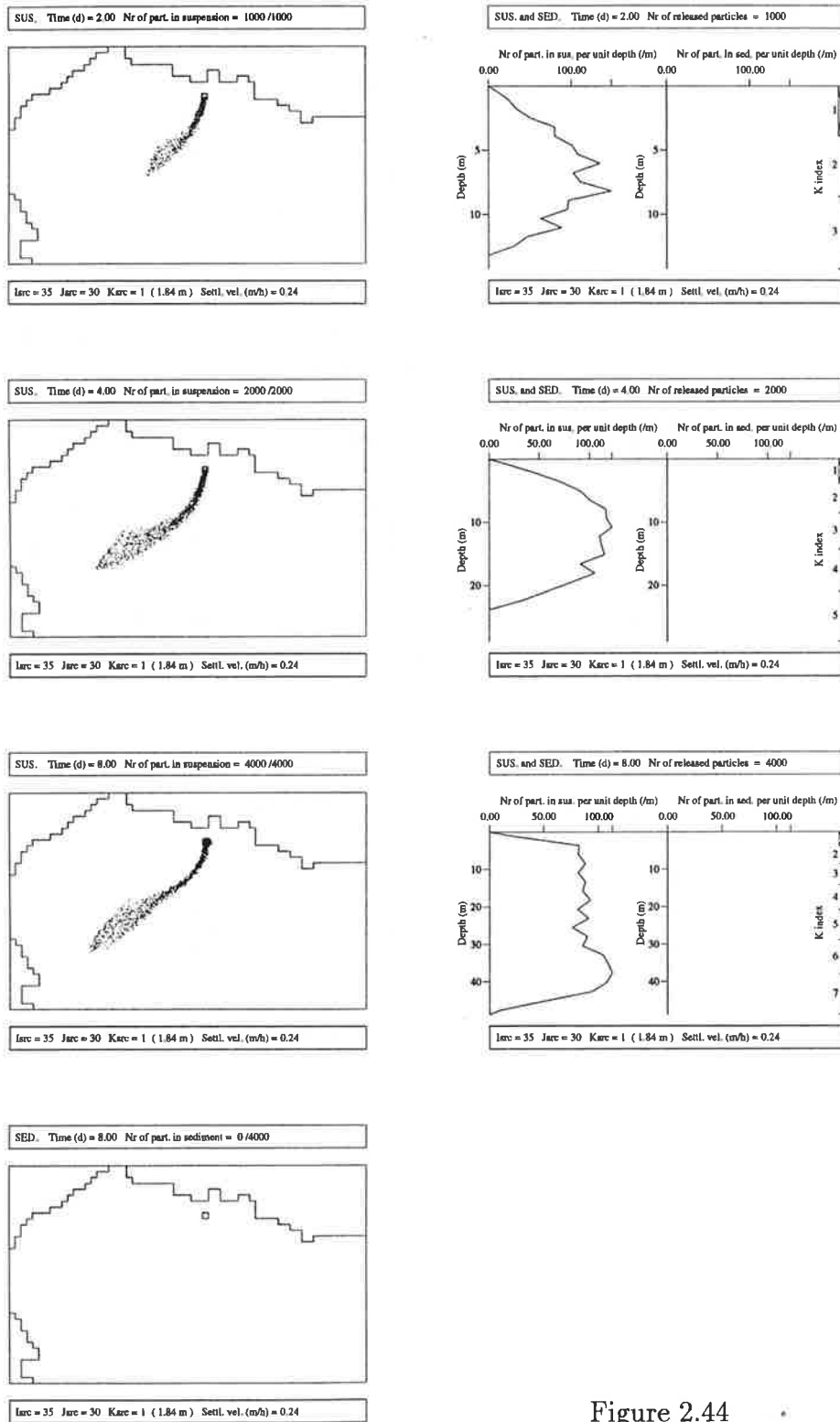


Figure 2.44

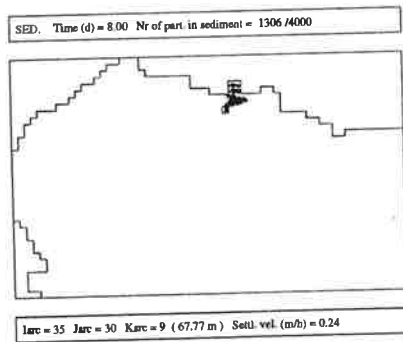
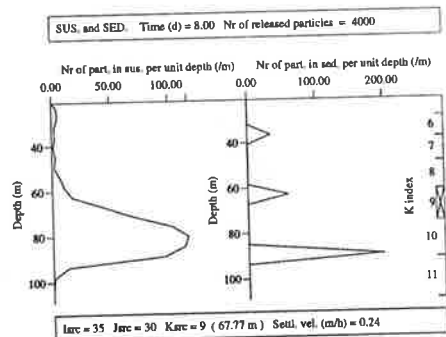
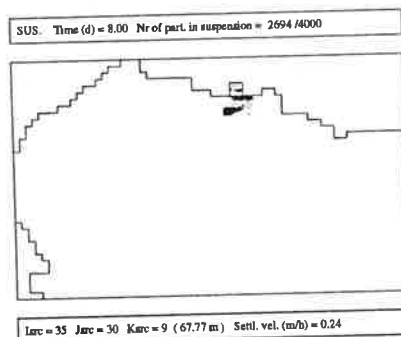
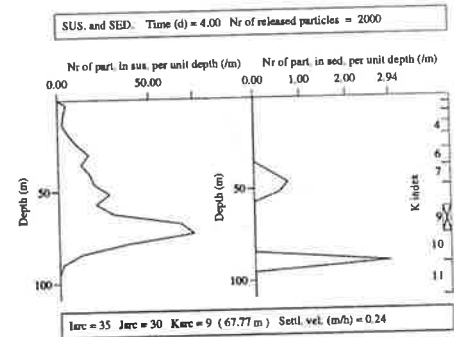
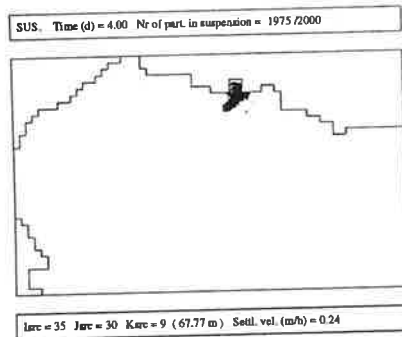
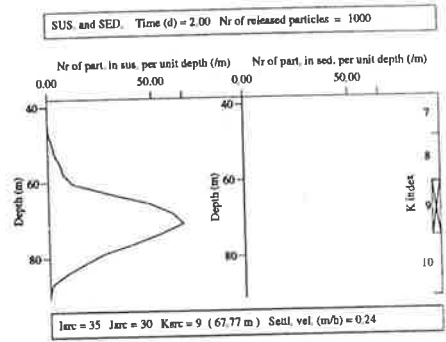
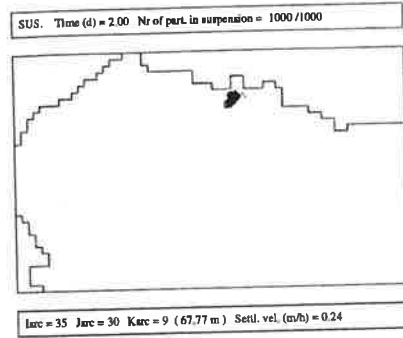


Figure 2.45

Figure 2.46: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas R. Le point source étant situé dans une zone de downwelling, le mouvement de chute des particules est accéléré, jusqu'à 55m de profondeur environ. A cette profondeur, un maximum de densité apparaît dans la distribution verticale (figure 4v), de valeur proche de celle que l'on aurait obtenue en l'absence d'advection verticale, à savoir  $d_0 = 86,8$  particules par mètre (voir tableau 2.4). Il faut noter le renversement du courant dont on voit la trace dans les distributions horizontales du 2e et du 4e jour: tout d'abord advectées vers le S, les particules sont ensuite entraînées vers le N, pour retrouver la direction du S un peu plus loin. Lorsque le vent est coupé, les particules continuent de s'enfoncer au rythme imposé par leur vitesse de chute tandis que leurs déplacements horizontaux restent réduits.

---

Figure 2.47: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas S. Durant les 4 jours de vent du NO, le courant à quelques mètres au-dessus du fond maintient les particules en suspension entre 70 et 90m et les déplace vers le NE sur une dizaine de km. A partir du moment où le vent cesse de souffler, le mouvement ascendant du fluide disparaît et les particules se déposent progressivement au N du point source.

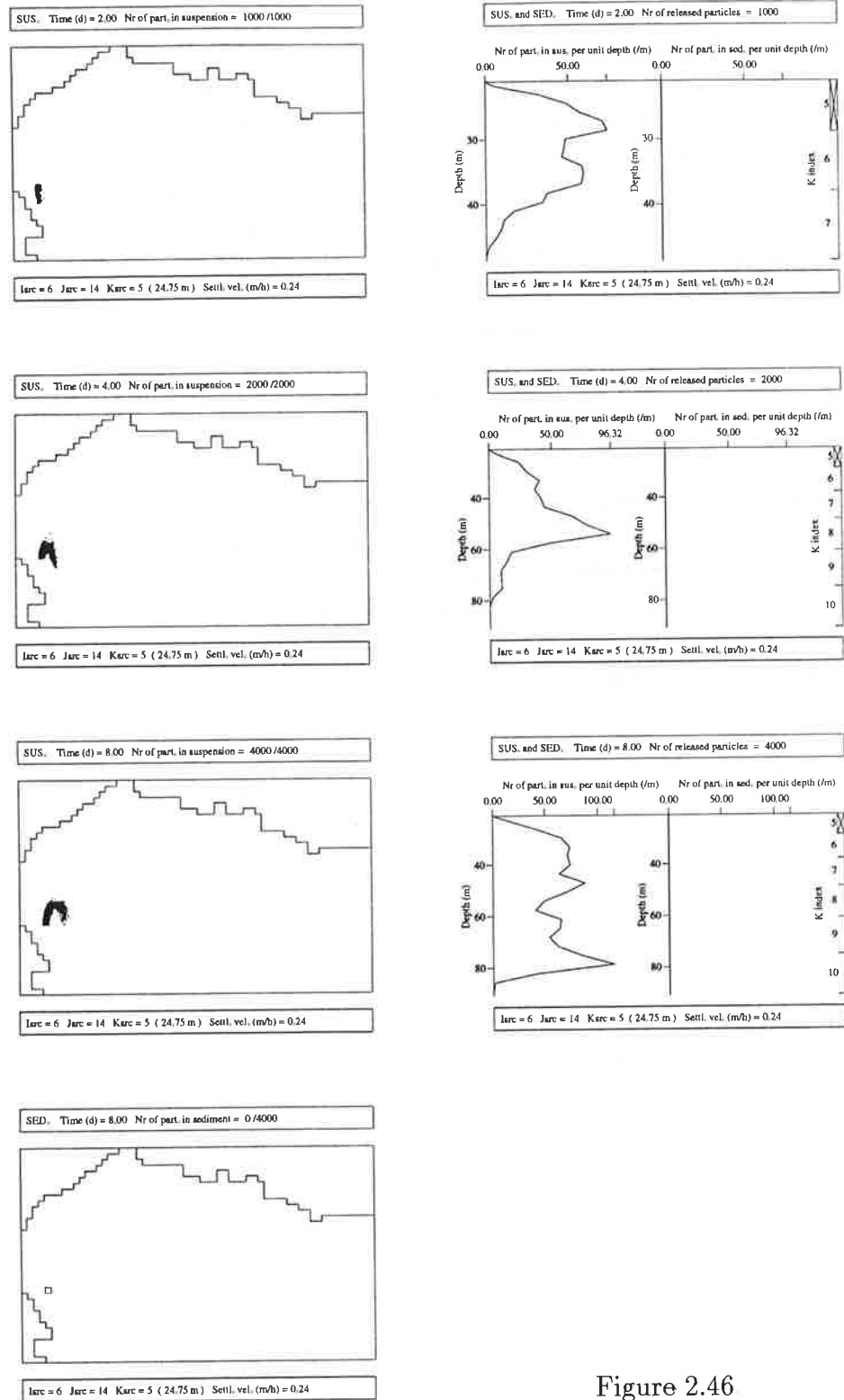


Figure 2.46

## 2.5 Simulation (février) par vent NO

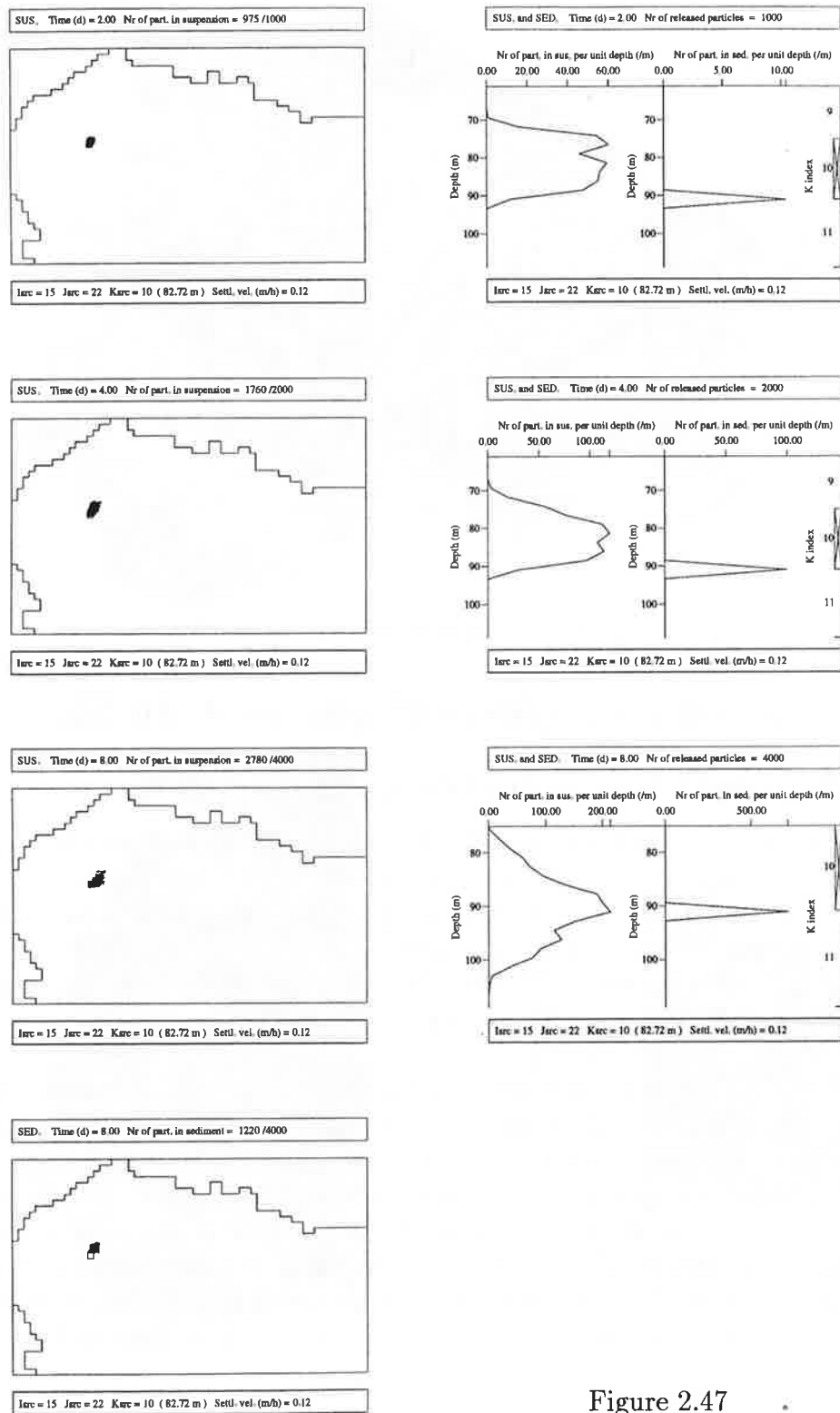


Figure 2.47

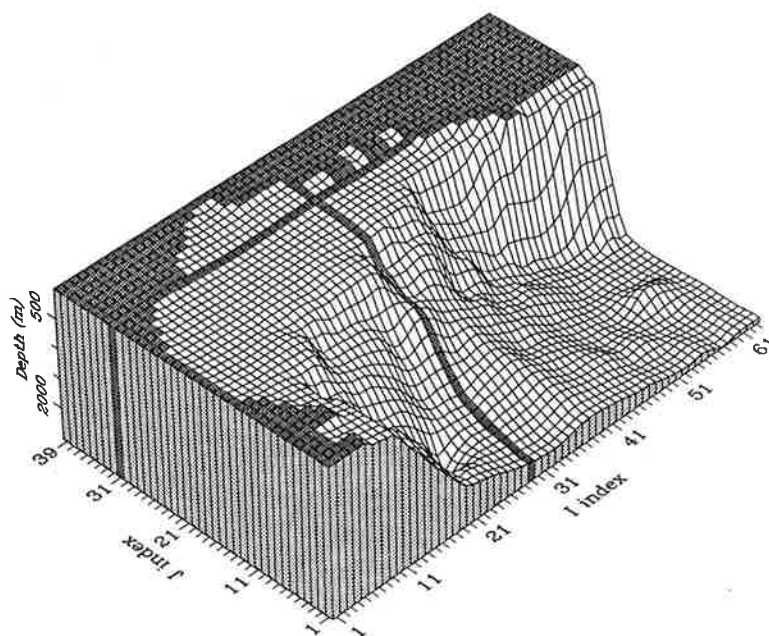


Figure 2.48: Localisation des coupes verticales

## 2.6 Simulation (février) par vent du SE

### 2.6.1 Simulation hydrodynamique

Une simulation par vent du SE a été effectuée dans des conditions de forçage analogues à celles de la simulation par vent du NO. Le vent souffle à vitesse constante (15m/s) du secteur SE (150°) pendant quatre jours puis le calme revient durant les quatre jours qui suivent.

Les dernières figures (2.49–2.51) de champs de vitesse, température et pression de surface sont consacrées à cette simulation.

Figure 2.49: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température au temps  $t = 1j$ . En surface, le courant est globalement orienté au N mais s'incline par endroits au NO ou au NE (coupe  $K = 1$ ). Sous la couche de surface, la circulation s'ajuste au forçage du vent de manière plus complexe (coupe  $K = 6$ ); sur le plateau continental néanmoins, le courant est orienté au SO. Cet ajustement des courants s'accompagne de mouvements verticaux importants (coupe  $I = 29$ ). Les upwellings apparaissent à proximité des côtes SO tandis que les downwellings se développent le long du littoral N (coupe  $J = 31$ ).

2.6 Simulation (février) par vent du SE

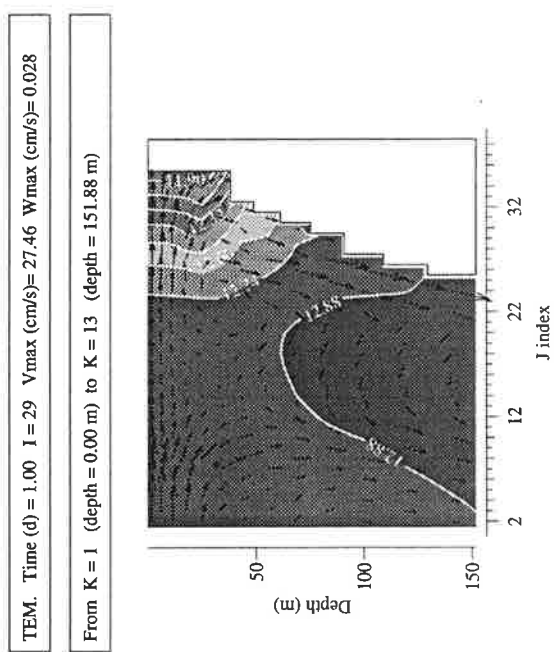
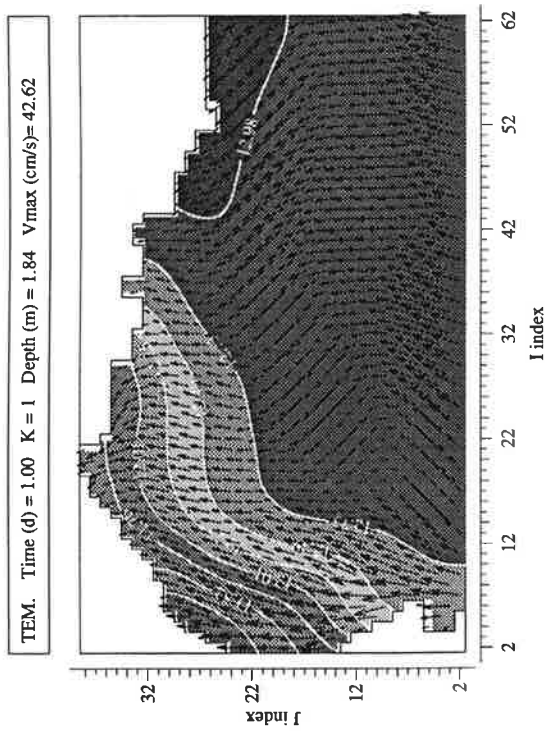
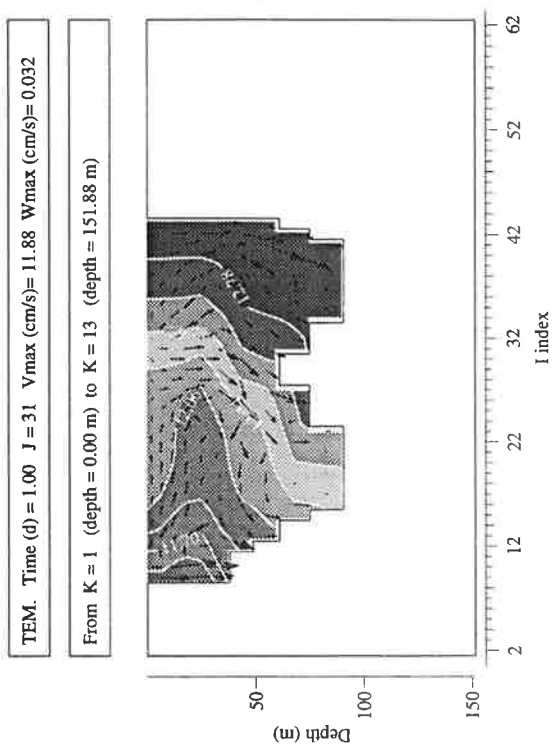
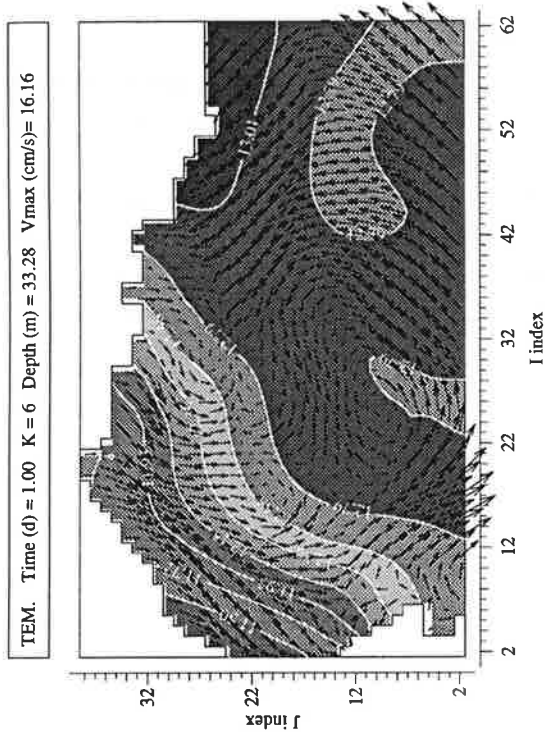


Figure 2.49

Figure 2.50: Coupes horizontales et verticales des champs de vitesse et température au temps  $t = 4j$ . Après 4 jours de vent du SE, le courant de surface est toujours orienté au N. Les mouvements verticaux observés à hauteur de  $J = 9$  dans la coupe  $I = 29$  sont associés aux variations d'intensité du courant de surface. Sous la couche de surface, un courant s'est développé le long du littoral NE. Le mouvement de downwelling s'accompagne donc d'un déplacement des masses d'eau vers l'ouest (coupe  $J = 31$ ). On note sur cette même figure l'homogénéisation verticale du champ de température.

---

Figure 2.51: Champ de pression de surface après 4 jours de vent du SE. L'élévation maximale est localisée à présent le long du littoral N, là où le courant de surface entraîne les masses d'eau. Bien que la différence d'élévation soit la plus grande relevée jusqu'ici, la pente de la surface reste modérée.

2.6 Simulation (février) par vent du SE

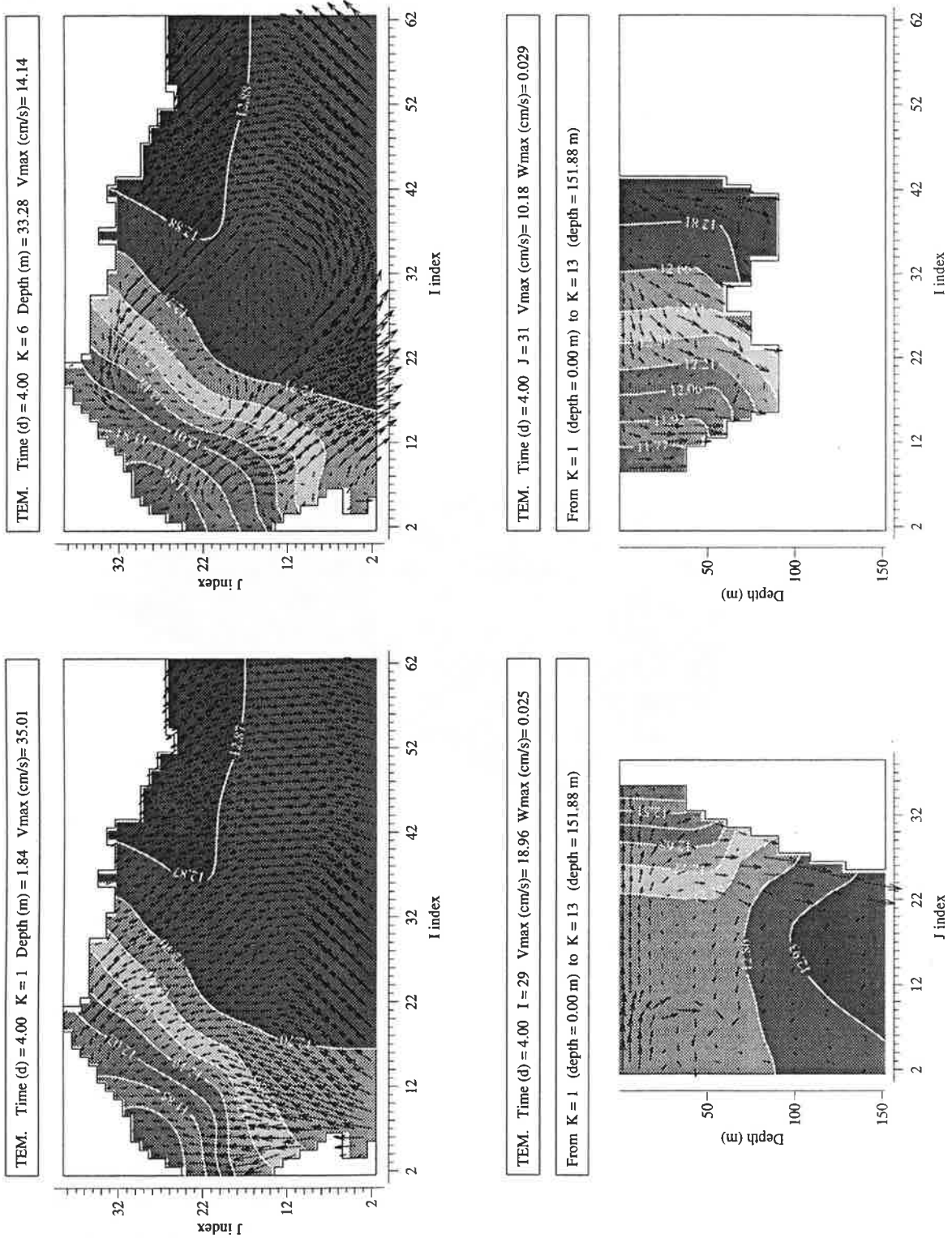


Figure 2.50

SURF. PRESSURE Time (d.hh) = 4.00 Zmin (cm) = -7.04 Zmax (cm) = 11.87

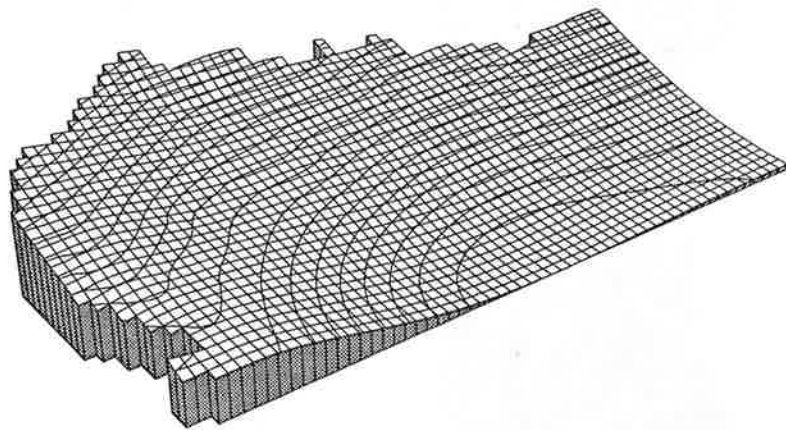


Figure 2.51

### 2.6.2 Transport de particules

Les trajectoires de particules relâchées aux mêmes points sources que dans la simulation par vent du NO (cas P à S) ont été calculées à partir des champs de vitesse obtenus ci-dessus. Le tableau 2.5 reprend les paramètres des 4 nouveaux cas (cas T à W).

<i>cas</i>	$(I, J, K)_{src}$	<i>débit</i>	<i>vit. de chute</i>	$\Delta h/10j$	<i>dens. <math>d_0</math></i>	<i>figure</i>
T	(35, 30, 1)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.52
U	(35, 30, 9)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.53
V	(6, 14, 5)	$500 j^{-1}$	0,24 m/h	57,6 m	$86,8 m^{-1}$	2.54
W	(15, 22, 10)	$500 j^{-1}$	0,12 m/h	28,8 m	$173,6 m^{-1}$	2.55

Tableau 2.5: Tableau synoptique des différents paramètres pour le calcul du transport des particules.

Figure 2.52: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas T. Le point source est situé dans une zone de downwelling et la chute des particules est fortement accélérée: en deux jours, les premières particules relâchées ont atteint la profondeur de 70m; sans advection par le fluide, elles auraient couvert moins de 12m de la colonne d'eau (voir tableau 2.5). Leur mouvement descendant est ensuite ralenti vers les 75m. Après 4 jours, quelques particules se sont déposées sur le fond. Au-delà du 4e jour, le downwelling disparaît et les particules reprennent un mouvement de chute plus lent.

Figure 2.53: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas U. Par rapport au cas T, le point source est situé plus en profondeur, au-delà des 75m qui marquaient la limite inférieure du downwelling. La chute des particules n'est donc plus accélérée et ces particules sont entraînées vers le SO par le courant de fond. Le vent coupé, leur déplacement horizontal est moindre et les particules se déposent sur le plateau au SO du point source.

Figure 2.54: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas V. Les particules sont relâchées vers les 25m de profondeur près d'une zone d'upwelling. Tant que l'upwelling est entretenu par le vent, la majeure partie du matériel reste à hauteur du point source. Lorsque le vent est coupé, les particules sont alors entraînées vers le SE où elles rejoignent le courant LP.

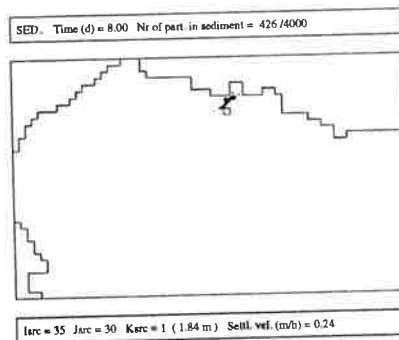
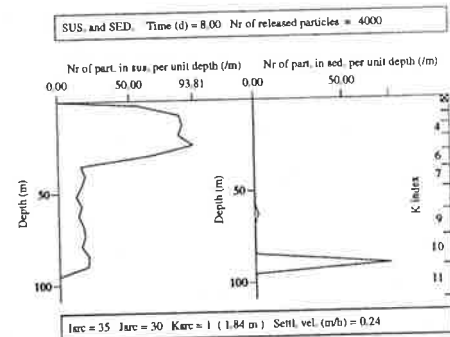
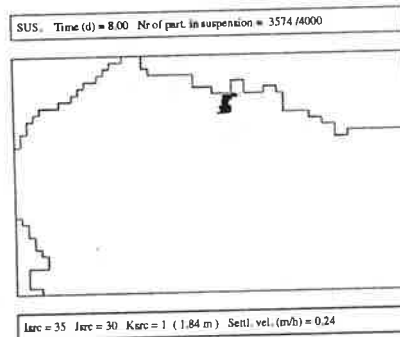
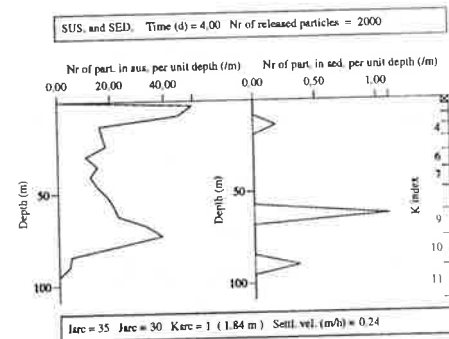
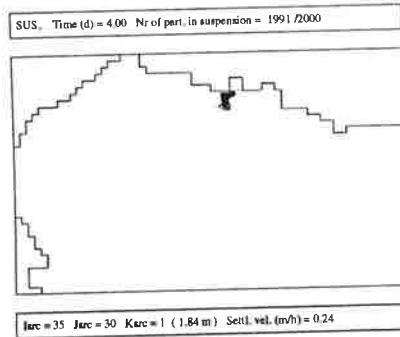
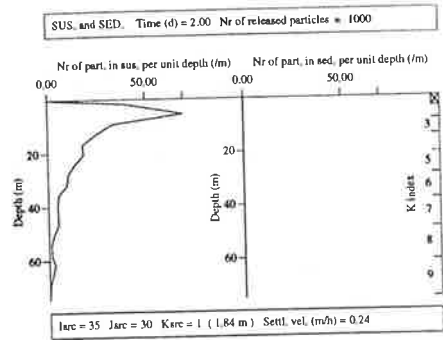
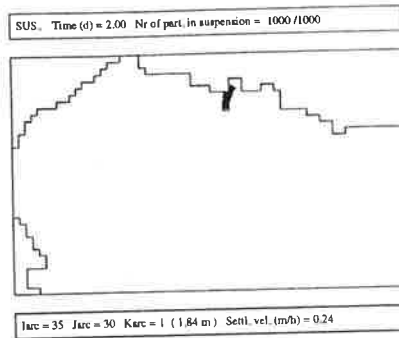


Figure 2.52

## 2.6 Simulation (février) par vent du SE

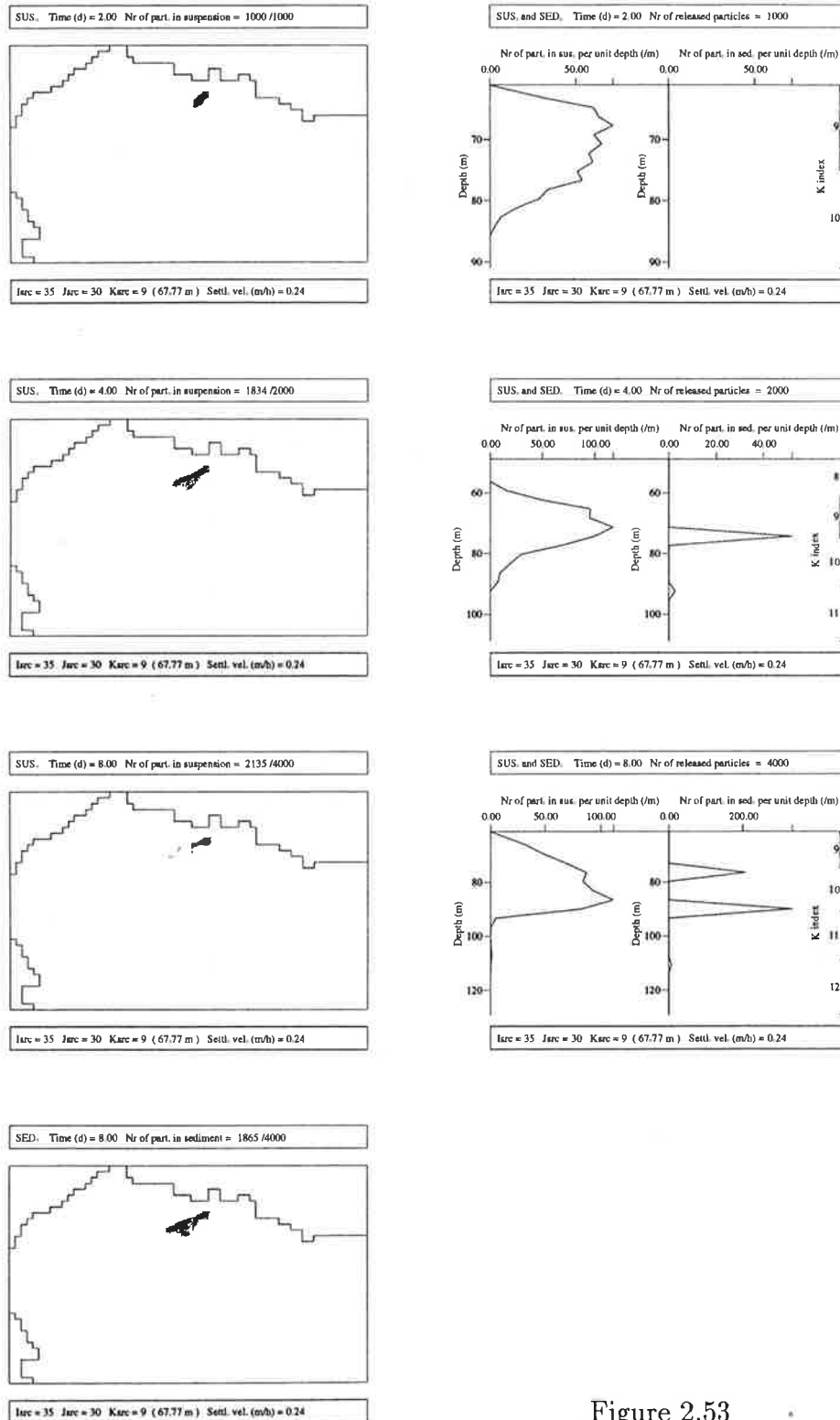


Figure 2.53

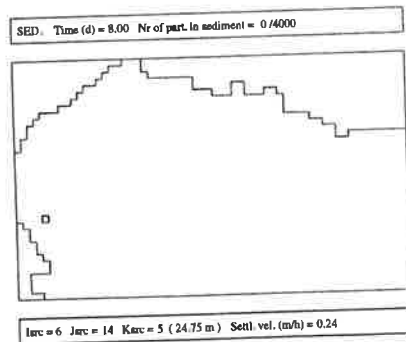
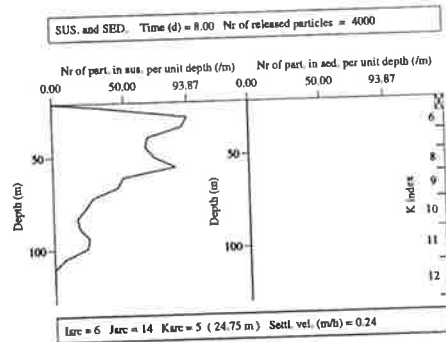
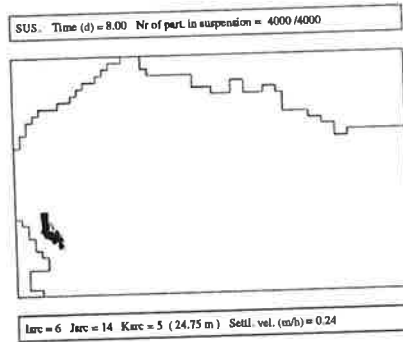
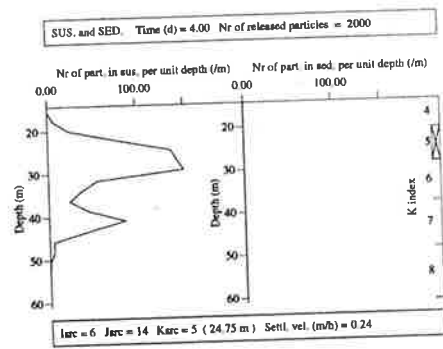
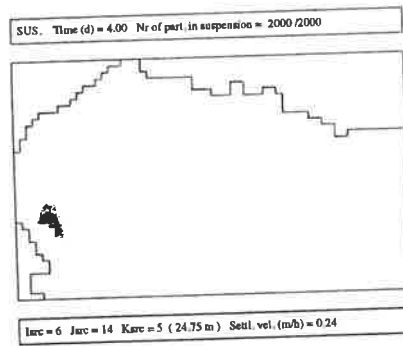
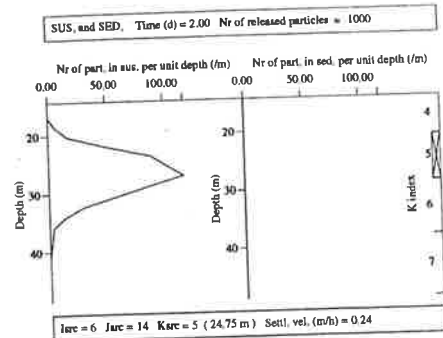
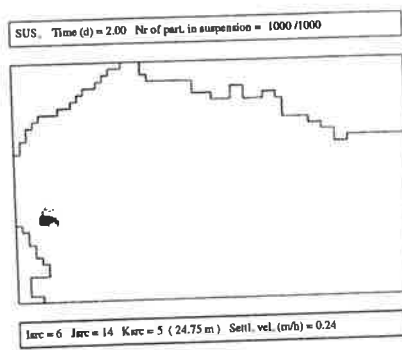


Figure 2.54

## 2.6 Simulation (février) par vent du SE

---

Figure 2.55: Distribution des particules en suspension et dans le sédiment pour le cas W. Le courant de fond transporte les particules vers le S et leur chute est quelque peu accélérée. Certaines particules, arrivées en bordure du plateau, sont alors entraînées dans un mouvement descendant beaucoup plus rapide: en 2 jours, les plus véloces sont passées de 120m à 200m de profondeur. Ce mouvement descendant le long de la pente disparaît une fois le calme revenu.

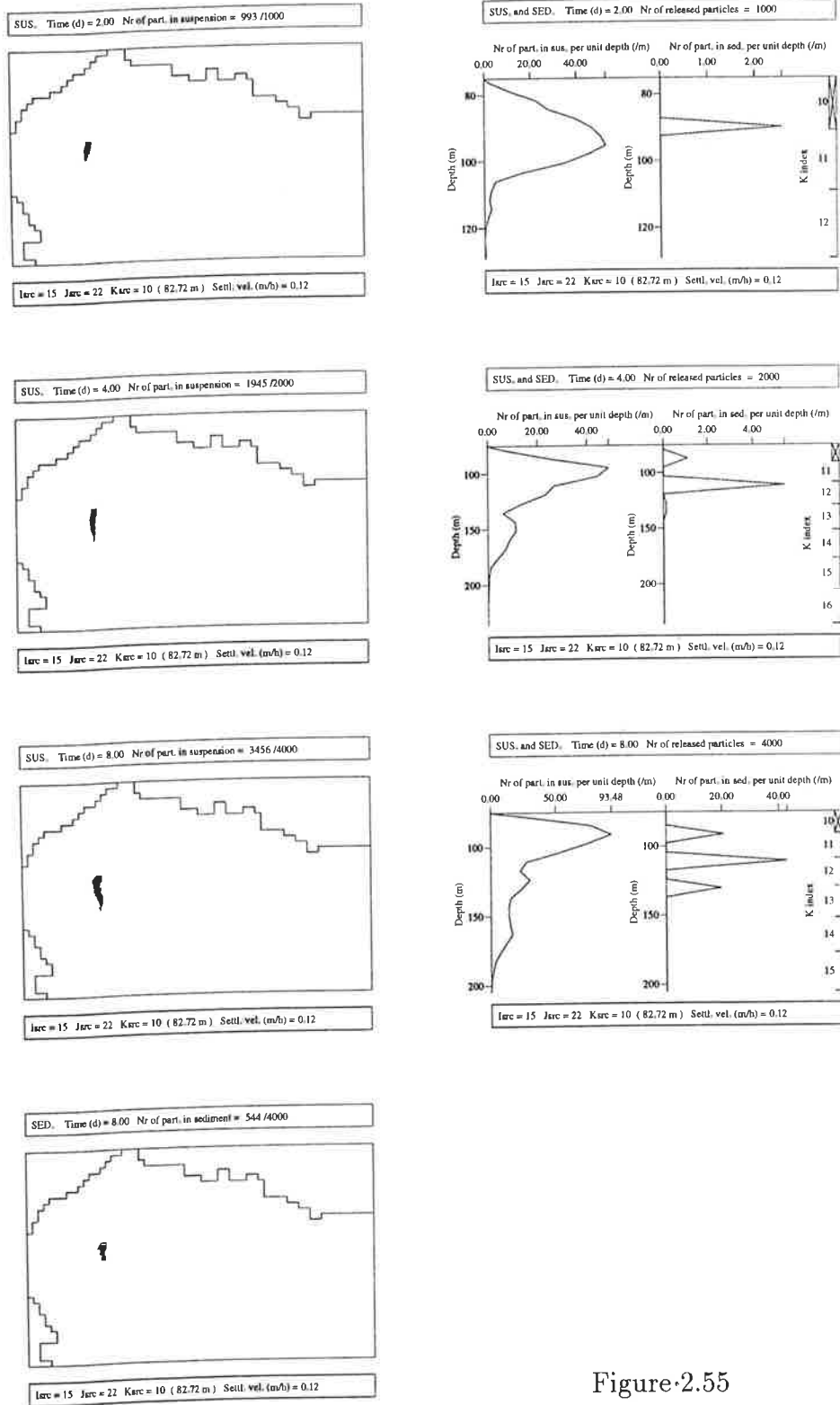


Figure 2.55