



MODÉLISATION FINE DES DÉRIVES LAGRANGIENNES EN MANCHE PAR UN CODE AUX ÉLÉMENTS FINIS

J.M. JANIN et F. DUMAS

Laboratoire Nationale d'Hydraulique (EDF)

6, quai Watier - B.P. 49

78401 Chatou cédex

Abstract

A residual current model has been performed by the L.N.H. (Laboratoire National d'Hydraulique of Electricité de France) in the Channel and the south part of the North Sea. It is a finite element model of about 13 000 elements coupled with 2 other finite element models for the boundary conditions.

This model will be useful either to simulate in real time, movements of a pollutant with accurate data of wind and pressure, but also to make a database of typical drifts associated with typical tidal and meteorological conditions in order to study long term transport.

In this article we describe the model, how we deal with mean sea level and first results of the sensitivity analysis.

I INTRODUCTION.

Le fait que les courants résiduels prennent une part essentielle dans le transport moyen a incité le développement d'outils d'investigation puissants. De nombreux secteurs du génie côtier s'intéressent de près à ce phénomène, qu'il s'agisse d'études de mouvements de sédiments, d'algues et micro-organismes ou de toutes sortes de polluants qui peuvent affecter les zones littorales.

Le Laboratoire National d'Hydraulique d'Electricité de France a initié en 1993 un important travail sur ce thème dont les objectifs sont doubles. Il s'agit d'une part de construire un modèle utilisable en toute circonstance. Cet outil sera à même de calculer des champs de déplacements totalement réalistes dès lors que les paramètres hydrologiques (force de la marée) et météorologiques (force du vent et du champ de pression) lui seront fournis. L'utilisation de cet outil peut être envisagée suite à une pollution accidentelle.

D'autre part, il s'agit d'établir une base de données sur les dérives en Manche pour des configurations nécessairement limitées mais caractéristiques des paramètres cités plus haut. Cette base pourra alors servir pour des études de déplacement-type, éventuellement à plus long terme, de sédiment ou de polluant.

Dans cet article nous présentons la première phase de ce travail qui a consisté en la réalisation du modèle, puis en l'étude de sa sensibilité à certains paramètres afin d'en appréhender les phénomènes générateurs ; une bonne connaissance de ces phénomènes est essentielle pour la constitution de la base de données. Cette étude est exclusivement numérique : l'ensemble des simulations ont été traitées avec le code de calcul aux éléments finis : TELEMAC-2D.

Ce problème de courants résiduels a déjà intéressé plusieurs instituts en France et à l'étranger. En France essentiellement deux laboratoires ont travaillé sur ce thème : celui de l'I.M.G. [1] et celui d'hydrodynamique et de sédimentologie de l'IFREMER [2]. Ce sont ces données et celles que rapportent ces articles qui nous ont permis de situer en partie nos résultats.

II DESCRIPTION DES PHENOMENES PHYSIQUES.

Notre domaine couvre la Manche et la partie méridionale de la Mer du Nord. Le cadre de l'étude est donc celui des mers littorales peu profondes : les points les plus profonds sont situés à 160 mètres sous le niveau de la mer.

II-1 La marée.

Dans ce type de mer littorale, le phénomène de marée résulte essentiellement de la propagation et de la réflexion de l'onde de marée venant des zones profondes (l'onde venant de la façade atlantique et l'onde qui a fait le tour des Iles Britanniques) plutôt que de l'attraction directe des astres sur la masse d'eau contenue dans le domaine.

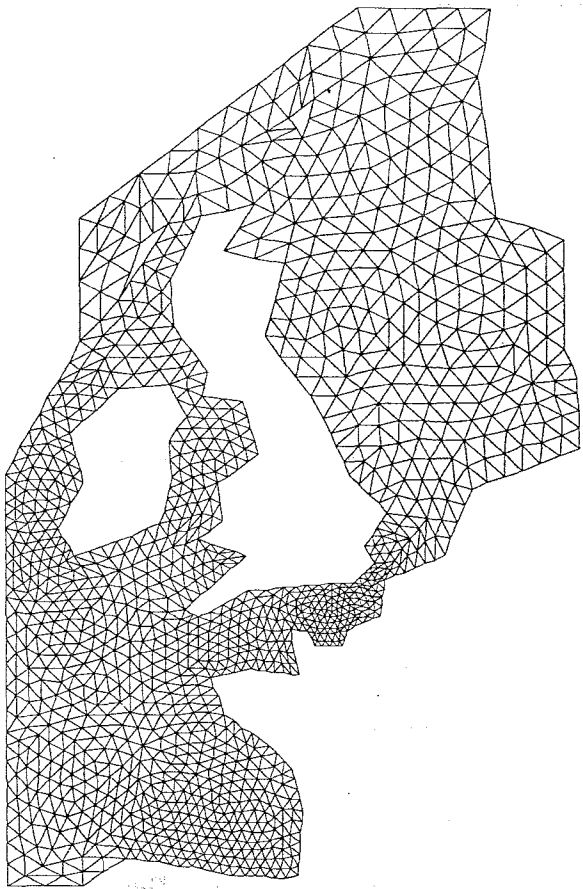
Les composantes de la marée sont réparties suivant leurs périodes : diurnes, semi-diurnes,... La région qui nous intéresse est le siège d'une marée à prépondérance semi-diurne.

Les observations faites sur les champs de courants établissent également un pic à très basse fréquence qui caractérise une circulation marine modulée sur une très longue période. Ces courants résiduels, en mers à fortes marées comme la Manche, sont toutefois d'un ordre de grandeur inférieur aux courants de marée à variations semi-diurnes.

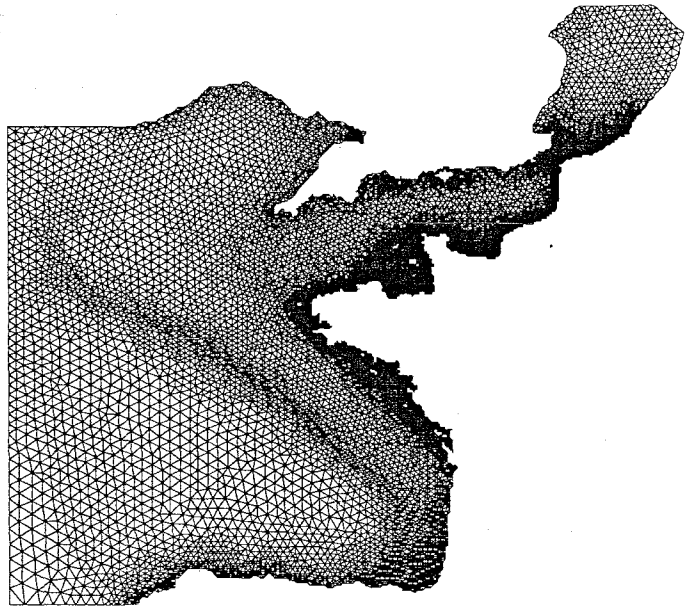
La première source de génération de ces courants est la marée elle-même. La non-linéarité des équations de la mécanique des fluides, comme les termes quadratiques de friction sur le fond ou les termes de convection, induit de nouveaux groupes de fréquences - i.e. que l'on ne trouve pas dans la décomposition du potentiel générateur - aussi bien vers les plus hautes fréquences (M4, MS4, MN4...) que vers les basses fréquences qui nous préoccupent.

II.2 Les conditions météorologiques.

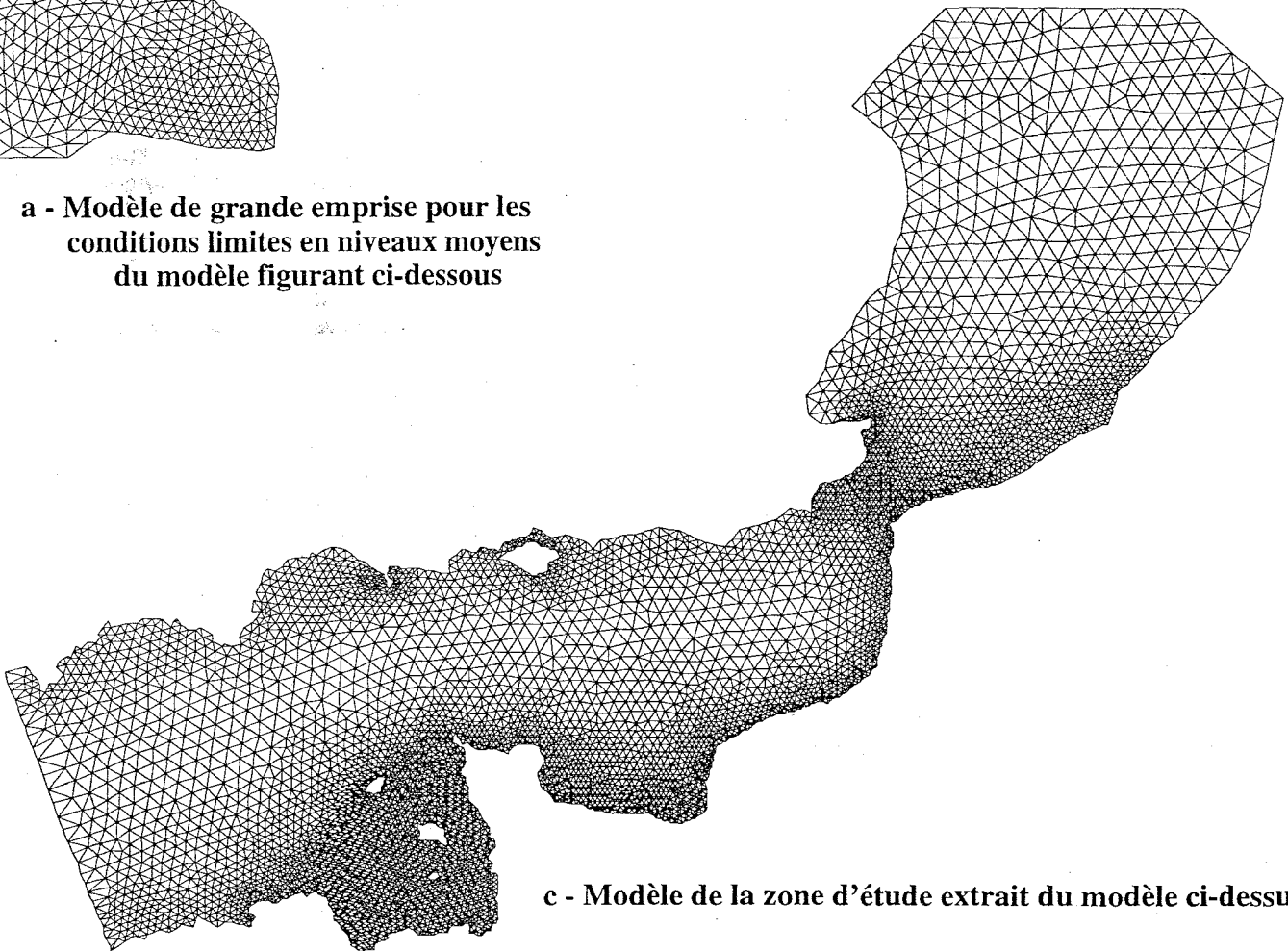
Les courants résiduels ou dérives sont d'une manière générale affectés par tout ce qui fait varier sur de longues périodes la pente du plan d'eau. Il existe en fait une étroite corrélation entre l'intensité de ces courants et ces mouvements lents de surface, de sorte que pour estimer



a - Modèle de grande emprise pour les conditions limites en niveaux moyens du modèle figurant ci-dessous



b - Modèle fin pour les conditions à la limite Ouest en onde de marée du modèle ci-dessous



c - Modèle de la zone d'étude extrait du modèle ci-dessus

Figure 1 : Les différents modèles utilisés

l'importance de tel ou tel phénomène physique pour la génération de dérive, il est équivalent de noter l'amplitude des mouvements de surface associés au phénomène. Pour être plus précis, le paramètre déterminant est la position du plan d'eau par rapport à une surface équipotentielle de gravité appelée géoïde.

Les effets de la pression atmosphérique sont aux rangs des phénomènes générateurs de dérive. La surface de la mer réagit en baromètre inverse aux variations spatiales de la pression. Typiquement, ils peuvent faire varier la position du plan d'eau d'une dizaine de centimètres sur des échelles de temps de l'ordre du jour à la semaine.

Les effets du vent, indissociables de ceux de la pression atmosphérique, viennent renforcer ces derniers. Ils leur sont de un à deux ordres de grandeur supérieurs. Généralement ces mouvements de la surface libre vont du décimètre au mètre sur des périodes de deux à dix jours. Localement, le vent agit par friction sur les particules de surface et augmente ainsi directement leur vitesse. A l'échelle d'une mer, le vent génère des circulations complexes influencées par d'autres paramètres comme la géométrie des bassins ou la force de Coriolis (cas des upwellings).

La modulation des conditions météorologiques avec les saisons se retrouve dans l'intensité des vents dont il a été question ci-dessus, mais il vient s'y ajouter des effets volumiques résultant des variations saisonnières de température de la couche de surface. On observe entre l'été et l'hiver des variations du niveau moyen pouvant atteindre le décimètre. Dans nos simulations c'est un paramètre qui ne sera pas pris en compte.

Notons enfin que les gradients de densité seront également négligés. L'hypothèse qui consiste à considérer la Manche comme un milieu homogène est tout à fait réaliste vu les faibles variations de salinité et de température que l'on y rencontre, à l'exception toutefois des abords des grands estuaires (Seine et Somme).

III LE MODELE NUMERIQUE.

III-1. Obtention du maillage.

Le code TELEMAR-2D a déjà été utilisé pour simuler la marée dans la Manche, le sud de la Mer du Nord et sur la façade Atlantique. Nous disposons donc d'un maillage fin de grande emprise (fig. 1-b) qui comporte 15 000 points pour près de 30 000 triangles. A partir de ce maillage nous avons extrait un domaine ne comportant que la Manche et le sud de la Mer du Nord (fig. 1-c). Ce nouveau maillage comporte environ 7 000 noeuds pour plus de 13 000 triangles. La taille des mailles varie de 2 à 20 kilomètres selon que l'on se trouve près de la côte (mailles fines), dans une zone de fort gradient de fond (mailles fines) ou dans un domaine à pente faible (grosses mailles).

III-2. Les conditions initiales.

Au temps $t = 0$, le plan d'eau est au repos (ainsi que l'atmosphère qui le surmonte, le cas échéant). Le milieu est alors excité progressivement par l'onde de marée. L'excitation se fait par les conditions aux limites en imposant les hauteurs. Ces hauteurs imposées sont

modulées sur les 2 500 premières secondes par une fonction linéaire afin de prévenir toute instabilité.

L'excitation du domaine peut aussi, pour certaines simulations, avoir lieu par la tension de vent. A nouveau pour des raisons de stabilité nous n'avons introduit le vent qu'au bout d'une période de la marée en accroissant sa force linéairement sur 4 000 secondes.

III-3. Temps de simulation et pas de temps.

La durée de simulation est de huit marées qui se répartissent en quatre marées d'initialisation et quatre marées au cours desquelles nous mesurons les paramètres qui nous intéressent (courants résiduels, niveau moyen, ...).

Les quatre marées d'initialisation ont été fixées au cours d'une étude précédente [4]. Cette durée de simulation est un compromis entre l'assurance d'avoir un signal tout à fait périodique et le coût calcul. Une onde semi-diurne qui passe au large de la pointe Bretagne met presque une période de la marée pour atteindre Zeebrugge; l'onde de marée réfléchiée sur la côte de Boulogne met le même laps de temps pour revenir à Brest.

Il faut donc au minimum deux marées pour que l'on ait le signal complet sur l'ensemble du domaine. Des tests de sensibilité ont montré qu'il fallait en fait quatre périodes de la marée avant d'obtenir un signal quasi périodique sur tout le domaine et ce à cause des réflexions multiples.

Le pas de temps est conditionné par la taille des mailles et la valeur maximale des vitesses que l'on doit simuler. En effet, la stabilité du calcul, compte tenu du schéma numérique choisi, dépend de la valeur du nombre de Courant ($U \cdot dt/dx$) qui doit être plus petit que l'unité.

Le pas de temps adopté est de 149 secondes, soit 300 pas pour une marée. La taille des mailles étant de 2 km au minimum et les courants au maximum de l'ordre de 2 m/s, cela donne un nombre de Courant inférieur à 0,15.

III-4. Conditions aux limites.

Les conditions aux limites sont, comme nous l'avons signalé plus haut, les valeurs des hauteurs d'eau. Elles sont obtenues en combinant hauteur d'eau au repos, donnée du niveau moyen et signal sinusoïdal de chaque onde de marée considérée.

Dans le cas qui nous occupe, les seules ondes prises en compte sont M2 et M4. Par la suite, nous étudierons les influences d'autres ondes du spectre de la marée dans la Manche (N2, S2...).

L'influence des valeurs aux bornes du domaine pour ce qui est des ondes M2 et M4 a été sommairement évaluée car nous disposons de deux jeux de conditions aux limites : les valeurs issues du modèle [4] et des mesures in situ [5]. Les simulations effectuées n'ayant pas montré de différences marquées entre l'emploi des unes ou des autres, nous avons interpolé au noeud du maillage :

- pour la frontière en Mer du Nord, les données bien documentées du Tidal Flow Forum [5] qui sont issues de mesures in situ.

- pour la frontière Ouest, les données issues du modèle fin (fig. 1-b).

IV ETUDE DU NIVEAU MOYEN.

Nous réservons une place particulière aux niveaux moyens car un travail important a été réalisé pour établir l'état des connaissances sur cette donnée. Cette donnée est capitale pour nos simulations car elle doit absolument nous être fournie aux bornes du domaine dès lors qu'il est établi que pente du niveau moyen et courants résiduels sont des paramètres étroitement corrélés. En fait, plus que la donnée brute de ce niveau, qui n'a de sens que dans un référentiel clairement établi, c'est surtout le différentiel entre frontières Ouest et Nord qui nous intéresse.

IV-1. Les données du P.S.M.S.L.

Un organisme anglais a pour mission de collecter, traiter et classer des mesures obtenues par des marégraphes répartis sur la totalité du globe. Chaque autorité nationale fait parvenir au P.S.M.S.L. - Permanent Service for Mean Sea Level - les enregistrements dont elle dispose. Le service organise alors les données dans des fichiers que l'on peut consulter sur un compte anonyme via le réseau Ethernet. C'est au total 1 000 stations qui sont concernées sur des périodes variant de un siècle (Brest) à quelques années. En un point, ces données de niveau d'eau sont associées à une référence commune au cours d'une année, mais d'une année sur l'autre il peut y avoir des variations de la référence. En général celles-ci sont indiquées par rapport à un repère géodésique fixe dont on connaît la cote dans un réseau de nivellement.

Toutes ces données apparaissaient au premier abord comme très précieuses, néanmoins, comme nous allons le voir, un certain nombre d'obstacles nous les ont rendues inexploitable.

IV-2. Les réseaux de nivellement.

Il existe à l'échelle de l'Europe un organisme qui prépare l'élaboration du réseau européen de nivellement U.E.L.N.- Unified European Leveling Network - dont le secrétariat est à l'université de Delft aux Pays-Bas, mais en attendant la mise en place de réseau, nous ne pouvons que répertorier tous les points dans le réseau de nivellement auquel ils sont rattachés et faire la correspondance entre les réseaux.

Nous nous sommes heurtés alors à l'imprécision des réseaux de nivellement. Par exemple, en France, il existe à l'heure actuelle deux réseaux, l'IGN69 et le NGF Lallemand. Ceux-ci ont été réalisés par mesure d'altitude de proche en proche, les portées utilisées étant de l'ordre de l'hectomètre. Comme en France la référence en matière de géodésie est le niveau moyen de la mer dans le port de Marseille, on conçoit aisément qu'une erreur de lecture infime accumulée quelque dix mille fois (1 000 km entre Marseille et Dunkerque) puisse engendrer des erreurs importantes par rapport à la précision de quelques centimètres recherchée. A Dunkerque, en effet, une différence entre les deux réseaux de 60 centimètres a été observée.

IV-3. Le géoïde.

En admettant que l'on parvienne à positionner tous les points qui nous intéresse dans un même référentiel et que

le système ainsi obtenu ne soit pas entaché d'erreurs rédhibitoires, il resterait à les placer par rapport à une surface équipotentielle de référence. Là encore les données font cruellement défaut.

La topographie du géoïde à l'échelle planétaire est globalement connue à partir de modèles numériques et de données altimétriques. En revanche, les mesures de microgravimétrie sont inexistantes et les modèles numériques de géoïde développés jusque là ont une résolution trop grossière pour obtenir une précision en-deçà de 50 cm.

IV-4. Conclusion et perspectives.

Au bilan, nous ne possédons pas toutes les données nécessaires pour caler notre modèle numérique. Les pentes que l'on s'attend à observer sont de l'ordre de quelques décimètres sur la longueur totale du domaine qui avoisine les six cents kilomètres. Une valeur aussi faible (au regard de la taille du domaine) pour pouvoir être correctement évaluée devra faire appel à l'avenir à des techniques extrêmement précises, on pense en particulier aux satellites, en tous cas plus précises que celles utilisées jusqu'à présent pour établir les réseaux de nivellement ou la topographie du géoïde.

L'I.G.N. dans des campagnes récentes [7] a déjà réalisé le rattachement de plusieurs marégraphes sur toute l'étendue du globe et ce dans un repère géocentrique : c'est le système BTS (BIH Terrestrial System). Ce rattachement est effectué par des techniques spatiales (GPS, DORIS, ...). L'application la plus prometteuse de ce travail est l'étude des variations temporelles du niveau moyen des mers. Mais le rapport cité ci-dessus fait encore état d'une précision de quelques centimètres à quelques décimètres ce qui donne des "résultats directement interprétables seulement sur des durées de plusieurs décennies."

IV-5. Choix des conditions aux limites de niveau moyen.

Devant cette impasse totale que semble être à l'heure actuelle l'exploitation des mesures in situ du niveau de la mer nous avons donc été amené à changer notre approche. Nous avons alors tenté de trouver, par un modèle de très grande emprise, l'information manquante. Nous avons en effet à notre disposition un maillage quasi complet de la façade européenne de l'Atlantique (fig. 1-a), utilisé par le passé justement pour des études de surcotes. Sur ce grand modèle se pose encore le problème des niveaux moyens à imposer le long de la frontière au large puisque cette information ne nous est pas plus connue en ce lieu. Il s'agissait alors de vérifier que cette condition à la limite n'influence que faiblement les pentes des niveaux calculés en Manche qui s'établissent donc librement au sein du domaine en réponse à la topographie et au forçage hydro-météorologique (vent, marée) comme c'est le cas en nature.

Sur ce maillage, nous avons fait tourner des simulations avec la seule onde de marée M2. Trois profils du niveau moyen imposés aux bornes ont été testés :

- niveau nul sur toute la frontière (repère 0-0).
- niveau nul en Scandinavie qui croît linéairement jusqu'à +30 cm en Espagne (repère 30-0).

- niveau nul en Espagne qui croit linéairement jusqu'à +30 cm en Scandinavie (repère 0-30).

Pour nous rendre compte de l'effet de cette condition à la limite, nous avons tracé les profils de niveau moyen obtenus le long et aux extrémité du modèle Manche :

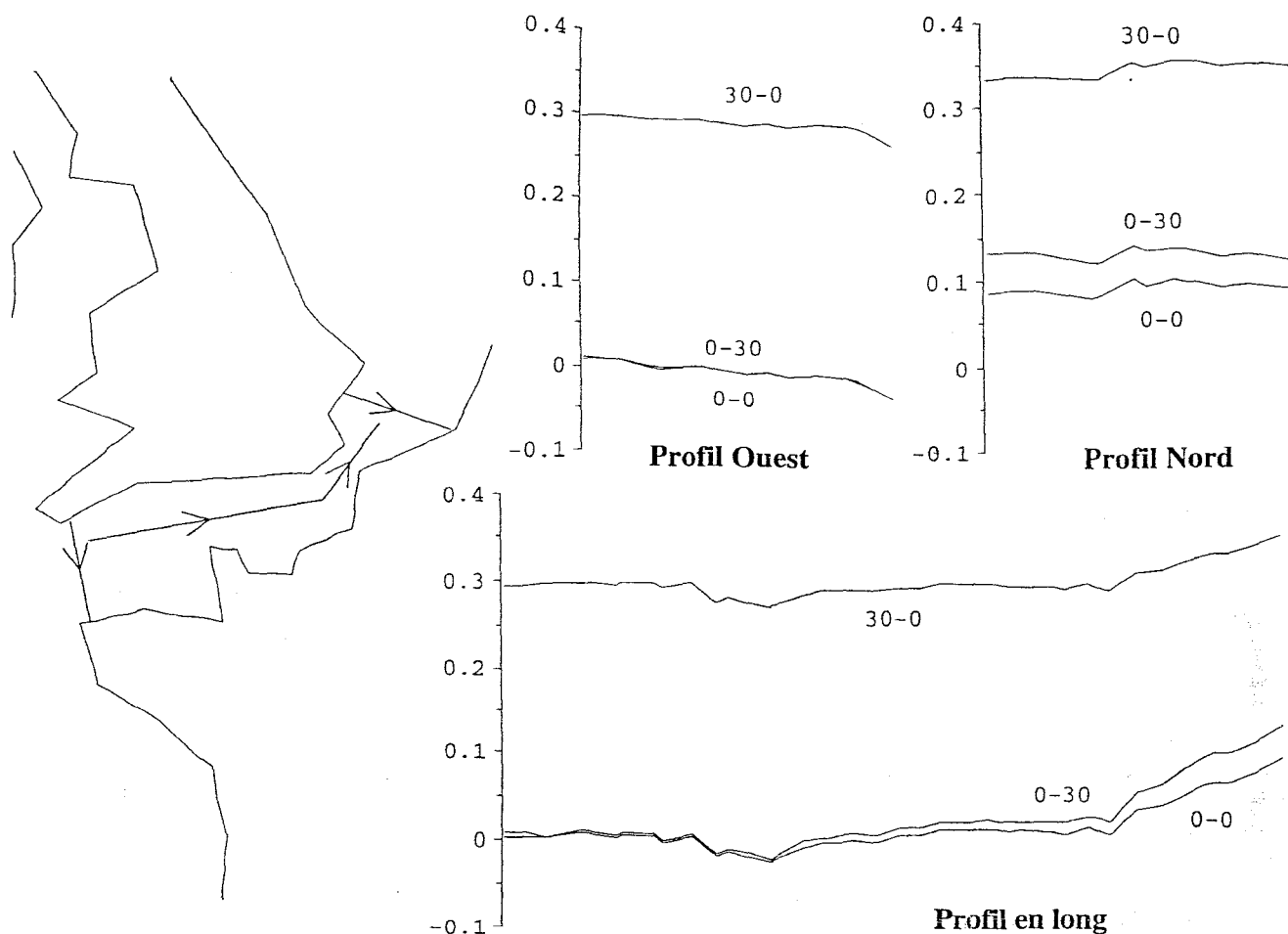


Figure 2 : Niveaux moyens en Manche pour différentes conditions à la limite du grand domaine

Ces profils montrent tout d'abord que la valeur du niveau imposé sur la côte espagnole fixe la valeur que l'on retrouve en Manche. A contrario la valeur en Scandinavie n'a que très peu d'influence sur les niveaux en Manche. Mais surtout, on observe que le niveau moyen aux bornes du grand domaine n'est ni influent sur l'allure des profils aux bornes du modèle Manche, ni sur la dénivellation entre ces deux bornes, ce qu'il fallait démontrer. Cette dénivellation est en fait systématiquement de l'ordre de 5 à 8 cm dans le sens montant en allant vers la Mer du Nord.

Par la suite, on s'en tiendra à un niveau moyen imposé nul à la frontière du grand domaine.

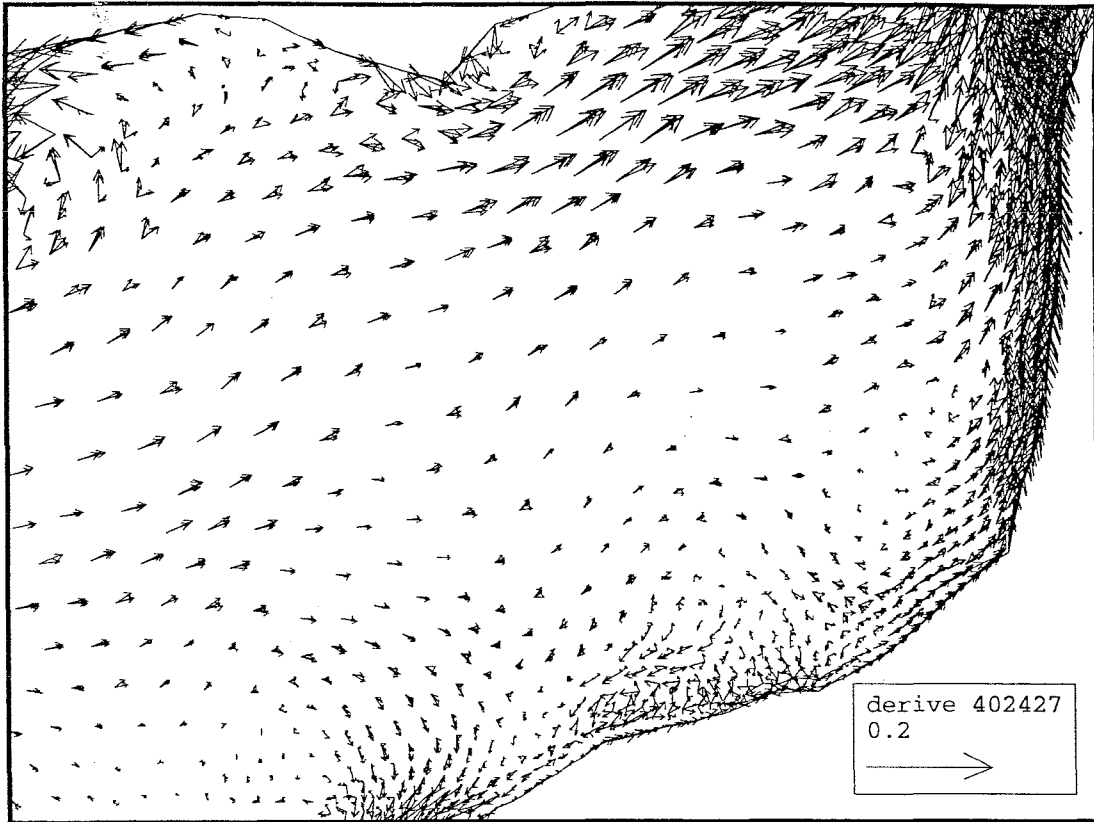
V RESULTATS ET ANALYSES.

Les résultats que nous présentons ici sont issus du modèle présenté dans ce qui précède. Les champs de dérives lagrangiennes ont été obtenues en calculant, sur

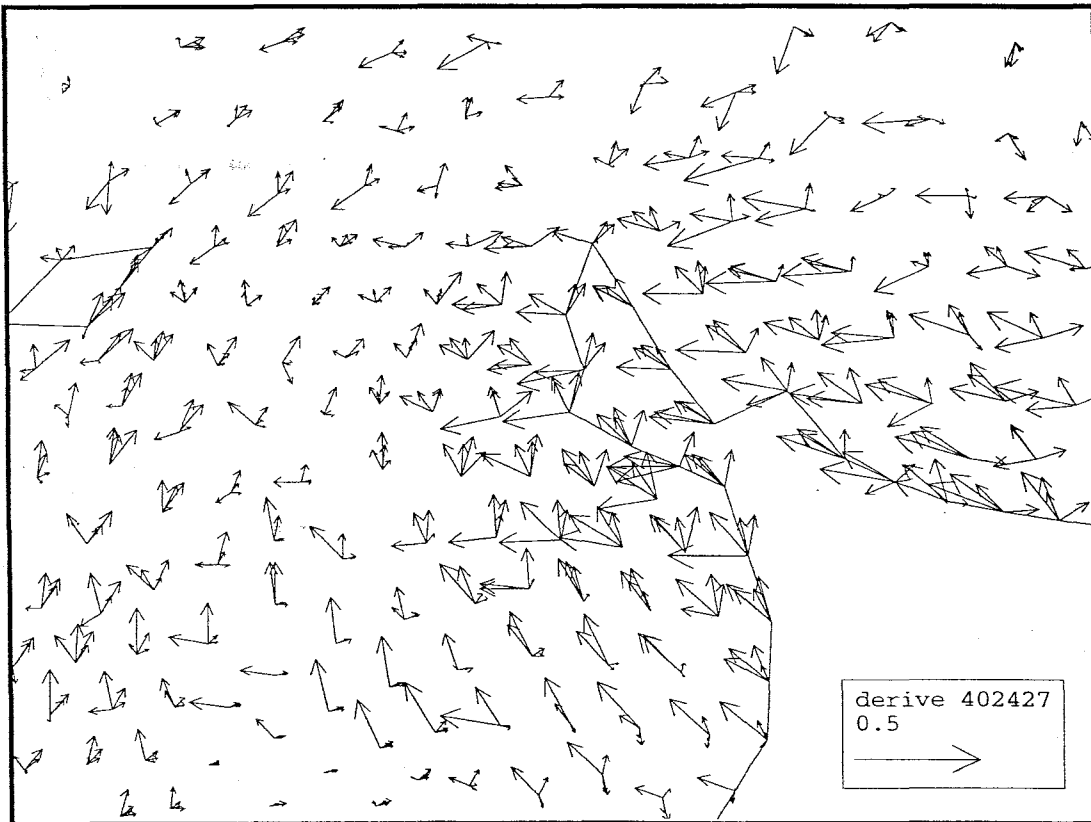
une période de la marée, le déplacement d'une particule d'eau issue de chaque noeud du maillage, puis en divisant celui-ci par la période de la marée. On obtient ainsi des champs de courant résiduel tels ceux des figures 3,4 et 6.

V-1. Influence du moment à partir duquel a été calculée la dérive.

Nous avons calculé des dérives initiées à douze instants différents de la marée répartis régulièrement sur une période. Dans la planche page suivante, nous avons reporté les dérives en 2 lieux et pour 4 instants différents référencés au port de St-Malo : pleine mer, pleine mer +3h, basse mer et pleine mer -3h. On s'aperçoit sur ces figures que l'instant d'initialisation des calculs est important dans les zones où la variabilité des courants en norme et en direction est forte (Cap de la Hague). En revanche, dans les zones où les courants sont plus faibles et les structures moins complexes (Manche

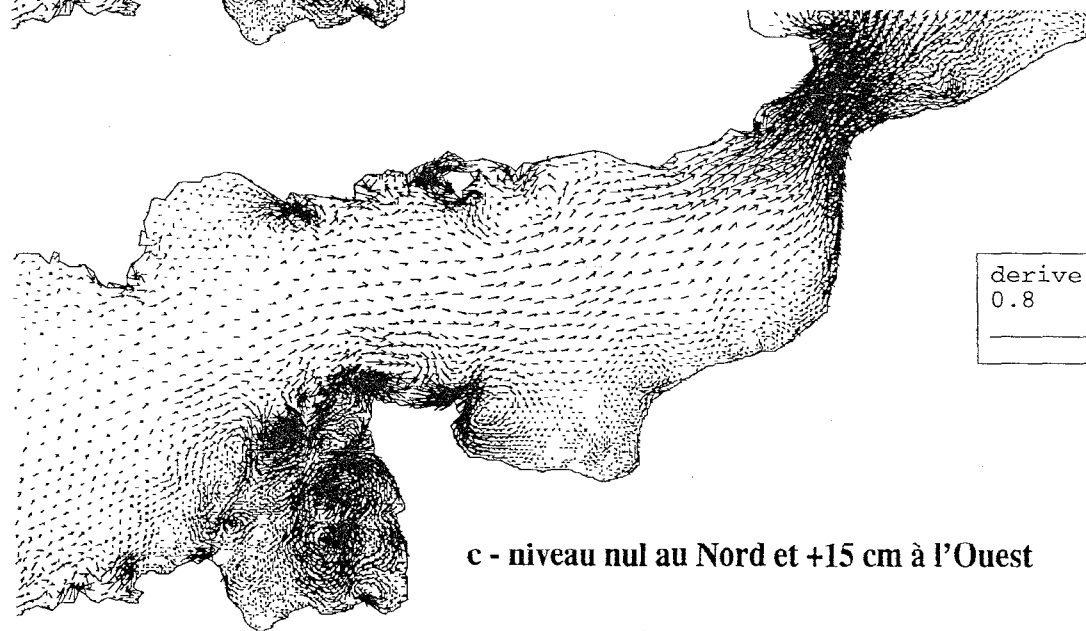
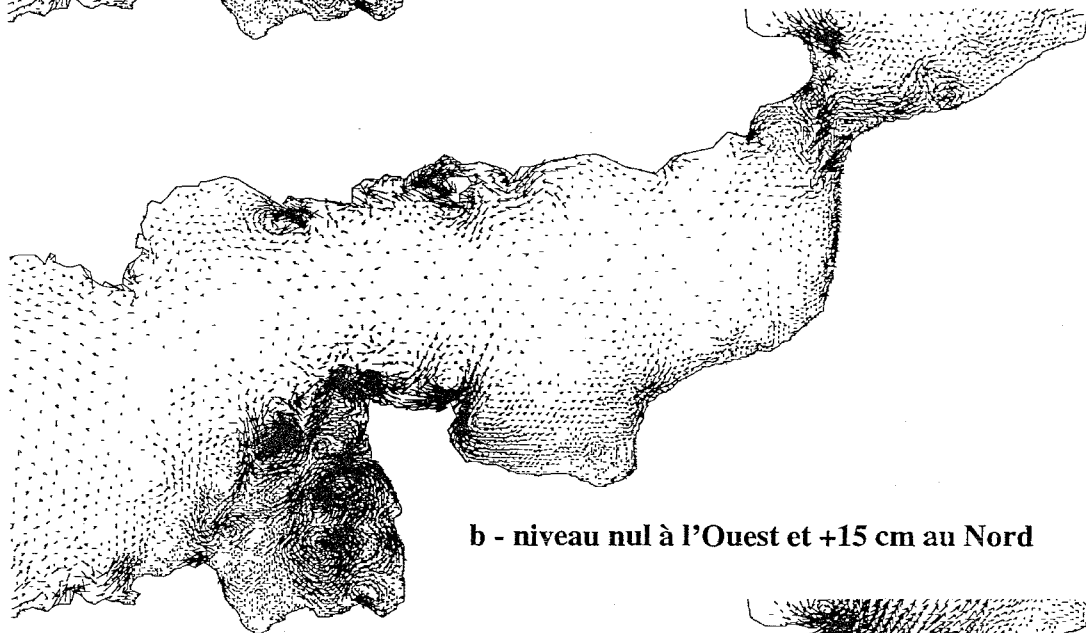
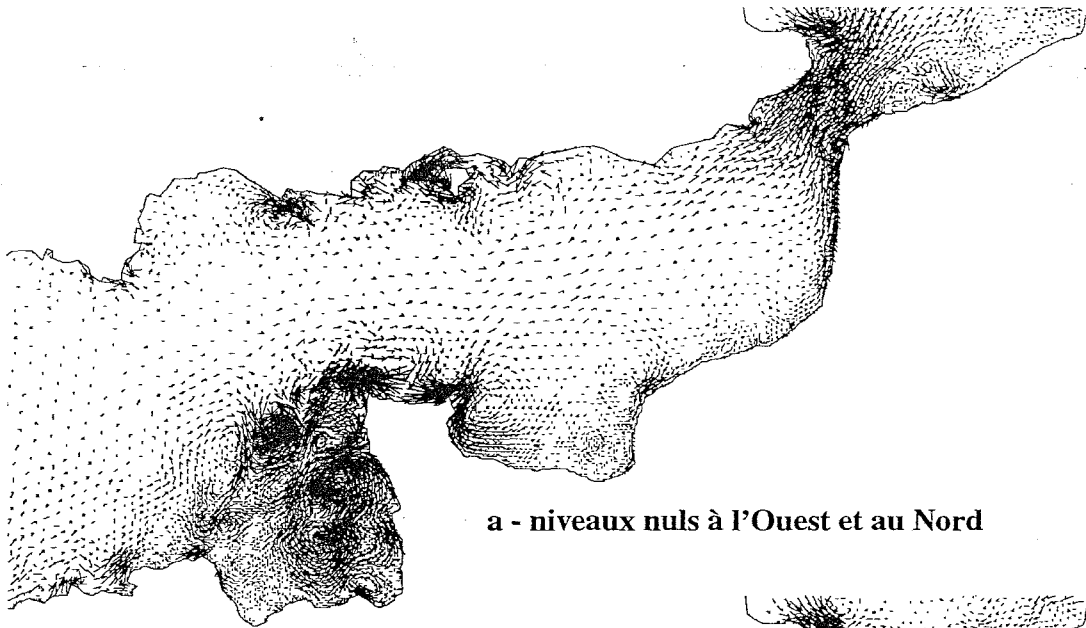


Manche Orientale



Cap de la Hague

Figure 3 : Dérives initiées à 4 instants différents de la marée



derive 402427
0.8
→

Figure 4 : Sensibilité aux niveaux moyens imposés aux 2 frontières ouvertes

orientale), l'influence de l'instant d'initialisation est faible. Cela se comprend ainsi : imaginons que l'on lâche un flotteur en un point de forte variabilité spatiale des courants ; suivant la phase de la marée à cet instant, il partira dans telle ou telle direction, puis étant entraîné par des courants fort différents, il aboutira, après une période de la marée, en des lieux différents.

V-2. Influence des niveaux moyens.

Nous présentons ici l'étude de sensibilité au niveau moyen. Nous n'avons pas cherché à imposer aux bornes de notre domaine des niveaux moyens fidèles à la réalité mais avons fait varier celui-ci dans des proportions (15 cm) tout à fait susceptible d'être observées en nature. Les valeurs imposées dans nos trois configurations ont été :

- niveau moyen nul aux bornes (fig. 4-a),
- niveau moyen nul à l'Ouest et +15 cm partout au Nord (fig. 4-b),
- niveau moyen nul au Nord et +15 cm partout à l'Ouest (fig. 4-c).

La première constatation est que cette valeur modifie sensiblement l'allure du champ de dérivés.

En particulier, des écarts importants sont enregistrés en Manche orientale, dans le Pas-de-Calais et entre Morlaix et Plymouth. Dans ces zones, l'intensité des dérivés varient en moyenne du simple au double entre les configurations -a- et -c-. Dans la configuration -b-, celles-ci s'annulent pratiquement, excepté dans le Pas-de-Calais où l'on note l'apparition d'une structure tourbillonnaire.

En revanche, dans les zones où les dérivés sont déjà fortes en -a-, comme dans le golfe normand-breton ou autour de la presqu'île du Cotentin et de l'île de Wight, on n'observe pas de variation significative aussi bien au niveau des intensités que des structures tourbillonnaires.

Par rapport aux résultats déjà publiés, nous sommes quelque peu en désaccord avec Salomon [9] qui affirme que les niveaux moyens n'ont pas d'influence significative sur les dérivés. L'autre personne à s'être prononcée sur ce sujet est Fornerino [1] qui au contraire montre une importance encore plus forte que nous du

paramètre sur les courants résiduels. On note en particulier dans ses résultats la disparition de tous les tourbillons pour une configuration voisine de -c-.

V-3. Influence du vent.

Les conditions de vent ont été choisies arbitrairement uniformes, de 10 m/s sur tout le domaine et sur toute la durée de la simulation, soit environ trois jours. Selon les statistiques une vitesse de 10 m/s sur trois jours est une configuration que l'on rencontre une fois par an. Observons également que nous n'avons pas pris en compte les effets de la pression atmosphérique qui tend à amenuiser ceux du vent. Nous allons discuter d'abord de l'influence sur le niveau moyen, puis de l'influence sur les dérivés.

V-3-1. Influence du vent sur les niveaux moyens.

La série de simulations sur le grand modèle montre l'influence de la force et de la direction du vent. Il faut savoir que, sans la présence du vent, le niveau moyen oscille sur la frontière nord entre 6 et 9 cm et sur la frontière ouest entre -2 et +3 cm. Les profils que nous présentons ci-dessous ont été faits aux mêmes endroits que ceux du paragraphe IV-5.

La direction du vent influence davantage la frontière Nord que la frontière Ouest.

On note, sur le profil Nord, un écart de 25 cm entre les configurations extrêmes (10 m/s Sud-Est et Nord-Ouest). Les configurations Sud-Ouest et Nord-Est accentuent la pente de ce profil dans un sens ou dans l'autre avec des niveaux intermédiaires aux précédents (voir figure ci-dessus).

Sur la frontière Ouest la variation des amplitudes due au cap du vent est plus faible : de l'ordre de 12 cm entre les situations Sud-Est et Nord-Ouest pour un vent de 10 m/s, tandis que d'une façon générale les variations sur un même profil sont de l'ordre de 2 ou 3 cm quelle que soit la condition de vent : le vent n'a pas d'influence marquée sur les pentes à la frontière Ouest.

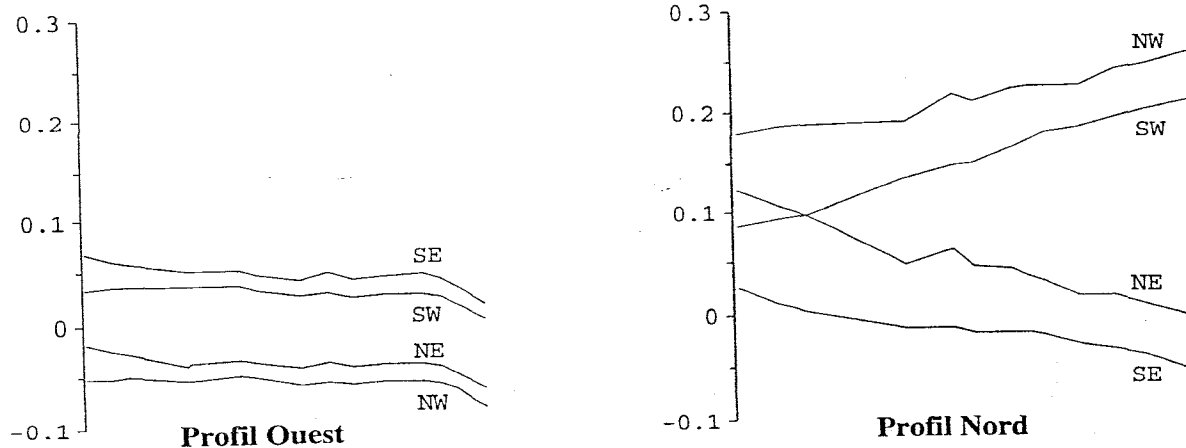


Figure 5 : Niveaux moyens pour 4 vents uniformes de 10 m/s imposés sur le modèle 1-a de grande emprise - voir position des profils figure 2

V-3-2. Influence du vent sur les dérives.

On a déjà vu que le vent influençait de manière importante les niveaux moyens et leur pente. Il faut donc s'attendre à ce que les dérives en soient également affectées. Nous avons extrait du grand modèle (fig. 1-a) les valeurs des niveaux moyens obtenus avec un vent de 10 m/s, puis nous avons simulé sur le modèle de la Manche quatre situations correspondant aux quatre secteurs de vent passés en revue sur le modèle 1-a. Les résultats sont consignés sur la figure 6.

La première chose à noter est la grande similitude entre les figures 6-b et 4-b d'une part, et 6-d et 4-c d'autre part. Si on fait un relevé des niveaux moyens aux bornes des simulations de 6-b et 6-d, on s'aperçoit que ces niveaux ont des écarts plus faibles qu'en 4-b et 4-c. L'effet de la friction du vent dans le domaine apparaît donc comme équivalent à une accentuation de la pente de niveau moyen entre les deux frontières, pente établie par ailleurs par effet du vent sur le grand domaine.

Dans la configuration de vent de Nord-Est (fig. 6-b) on a presque annulation du courant de dérive sur le domaine, sauf dans le golfe normand-breton et dans le Pas de Calais où, comme en 4-b, apparaît une structure tourbillonnaire.

Dans la configuration de vent de Sud-Est (fig. 6-d) on observe un flot dirigé vers le Nord du Pas de Calais. Le golfe normand-breton ne semble pas, là encore, affecté par ce vent. Le tourbillon de Barfleur s'est déplacé vers le Sud et s'est étendu à une grande partie de la Baie de Seine.

L'effet du vent de Sud-Ouest (fig. 6-c) est très marqué aux abords du Pas-de-Calais où les dérives sont très amplifiées. Dans la baie de Seine et le long du Pays de Caux, on note également une accélération des vitesses.

Dans la configuration de vent de Nord-Ouest (fig. 6-a) le sens du courant est inversé et son intensité est de l'ordre de 10 cm/s en moyenne. Le vent influe aussi sur la structure : c'est la seule configuration où le tourbillon de Barfleur est détruit. De même la recirculation au Nord du Cotentin est alimentée par l'Est et non plus par l'Ouest. Enfin à l'Ouest de la zone très turbulente du golfe normand-breton, on observe la destruction d'une autre structure tourbillonnaire.

V-3-3. Conclusion.

L'élément qui nous a permis en partie de valider quantitativement nos résultats est l'intensité du flux moyen calculé dans le Pas-de-Calais. Ci-dessous figurent quelques valeurs du débit moyen évalués au cours d'une marée moyenne par différents auteurs :

Wyrski (1952 in Postma, 1990) :	33 000 m ³ /s.
Cartwright (1961) :	50 000 m ³ /s.
Pingree et Maddock (1977) :	50 000 m ³ /s.
Prandle (1978) :	36 000 m ³ /s.
Pingree et Griffiths (1980) :	30 000 m ³ /s.
Pingree et Maddock (1985) :	40 000 m ³ /s.

Salomon donne dans [2] le tableau suivant des débits (x 10³ m³/s) en valeur moyenne mensuelle :

Année	Jan.	Feb.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
1983	206	58	129	204	220	93	82	65	217	230	87	206	150
1984	232	83	75	63	37	93	87	89	121	168	184	194	119
1985	111	105	99	100	74	125	130	178	127	184	80	150	122
1986	141	8	134	87	155	91	102	134	66	97	157	120	108
1987	58	135	132	124	35	132	52	67	156	142	53	228	109
1988	248	134	55	145	115	90	129	63	77	182	94	-8	110
1989	150	140	106	61	85	59	57	77	67	138	127	289	113
1990	165	178	111	53	74	97	93	84	79	109	98	80	102
1991	139	75	100	74	35	124	116	88	81	83	134	102	96
Moy.	161	102	105	101	92	100	94	94	110	148	113	151	114
E. T.	60	52	27	49	62	23	28	38	51	48	41	89	15,5

Nous avons obtenu, pour les conditions des simulations décrites plus haut, les valeurs des débits suivantes :

niveau moyen nul, vent nul :	63000 m ³ /s.
niveau moyen +15 cm au nord, nul à l'ouest, vent nul :	-16800 m ³ /s.
niveau moyen +15 cm à l'ouest, nul au nord, vent nul :	143200 m ³ /s.
niveau moyen restitué du grand modèle, vent 10 m/s de nord est :	1300 m ³ /s.

niveau moyen restitué du grand modèle, vent 10 m/s de nord ouest :	-98900 m ³ /s.
niveau moyen restitué du grand modèle, vent 10 m/s de sud est :	125800 m ³ /s.
niveau moyen restitué du grand modèle, vent 10 m/s de sud ouest :	169300 m ³ /s.

Ces valeurs sont tout à fait dans la gamme des valeurs proposées. Pour la première configuration nous avons un débit légèrement supérieur aux valeurs fournies par les autres auteurs, ce qui est cohérent avec

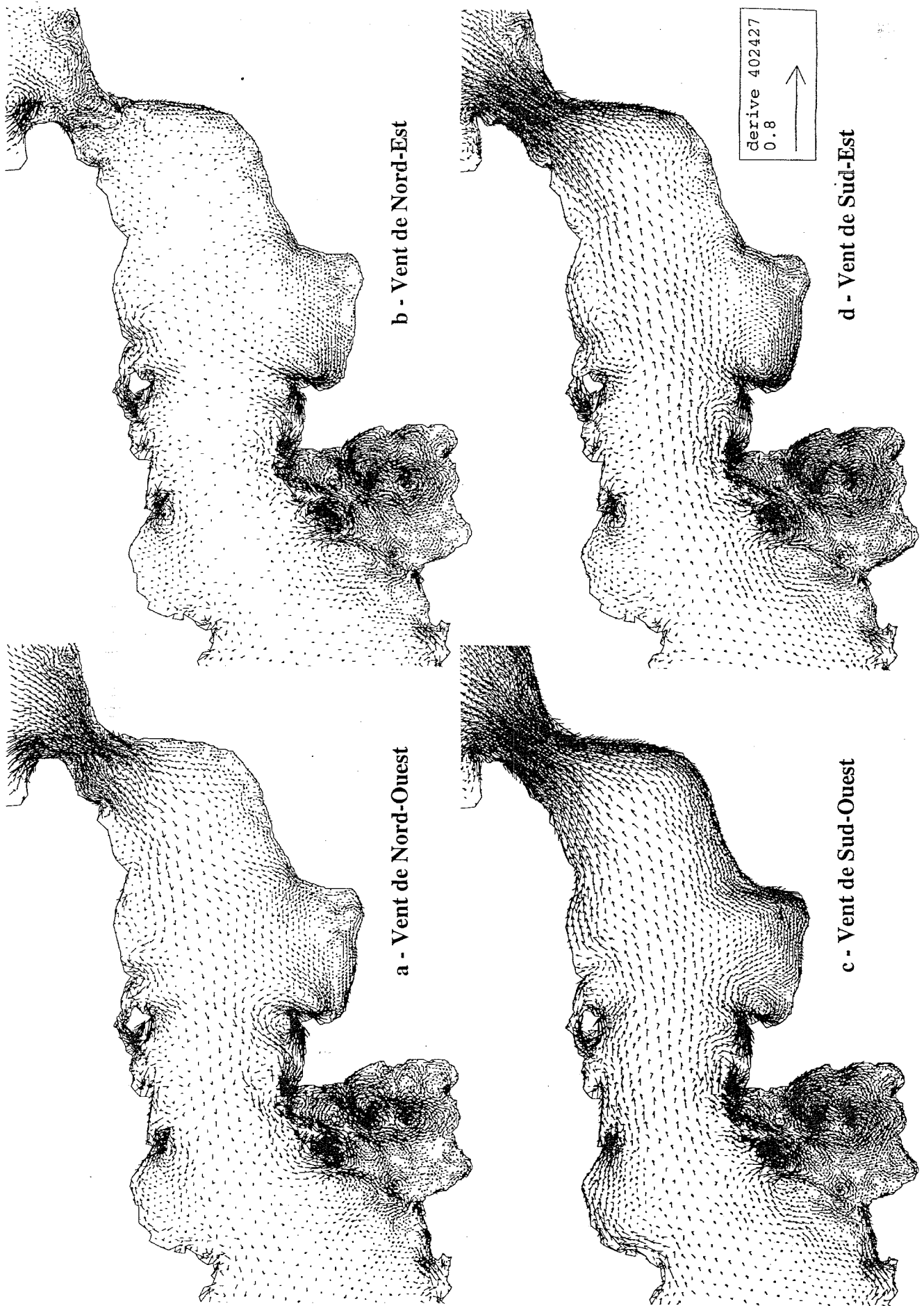


Figure 6 : Sensibilité à 4 vents uniformes de 10 m/s imposés sur les modèles 1-a puis 1-c

la dénivellation de 5 à 8 cm observée en réalité sur le grand domaine. On note par ailleurs que toutes nos valeurs se retrouvent dans la gamme des valeurs données par le tableau de Salomon, à l'exception du flux important vers la Manche, par vent de Nord-Ouest, que l'on ne retrouve nulle part dans le tableau. Cette configuration de vent de Nord-Ouest est surtout marquée par une dénivellation importante du niveau moyen de 25 cm entre frontières Ouest et Nord (fig. 5) qu'il nous apparaît important de prendre en compte.

VI CONCLUSION.

A l'issue de cette première étape d'un important travail sur les dérives en Manche, nous avons construit le modèle puis établi la liste des paramètres sensibles susceptibles d'être analysés par celui-ci. Il s'agit : du niveau moyen, du vent, du champ de pression atmosphérique et de la force de la marée. Nous avons, d'ores et déjà, étudié l'importance des 2 premiers paramètres en les faisant varier d'une simulation à l'autre.

Le niveau moyen, pour des fluctuations de plus ou moins 15 cm aux bornes du domaine, nous l'avons vu, influence peu les structures générales des champs de dérives (dérive générale vers l'Est, tourbillon à Barfleur, zone turbulente dans le Golfe Normand-Breton), mais en revanche module de façon importante l'intensité de ces courants résiduels.

Le vent influence l'écoulement aussi bien par la variation du niveau moyen qu'il provoque que localement par l'entraînement des particules d'eau en surface. Il influence à la fois les structures et module fortement le flux dans le Pas-de-Calais.

La question à propos de ces paramètres est de savoir comment obtenir des valeurs réalistes en temps réel pour caler le modèle dans l'optique, par exemple, de prédire l'évolution d'une nappe de polluants. En ce qui concerne le vent, nous disposons de nombreuses stations météo capables de nous fournir des données directement exploitables pour les simulations. En revanche, pour le niveau moyen, nous avons vu que les mesures in situ étaient inutilisables dans l'état actuel des choses. Le seul moyen d'approcher cette information est de faire tourner un modèle de grande emprise englobant très largement le domaine d'étude. Ainsi, les données du niveau moyen aux bornes de ce grand domaine, qui nous sont tout aussi méconnues, n'influencent que faiblement les pentes des niveaux calculés dans la zone d'intérêt qui, par ailleurs, s'établissent librement en réponse au forçage hydro-météorologique (vent, marée) comme c'est le cas en nature.

Bibliographie.

[1] M.Fornerino. Modélisation des courants de marées dans la Manche. Thèse de l'université de Grenoble et de l'INPG, 1982.

[2] J.C. Salomon, M.Breton, P.Guegueniat. Computed residual flow through the Strait of Dover. A paraître dans *Oceanologica Acta*, vol. spécial sur le symposium Manche.

[3] C. Le Provost. Le niveau de la mer, un index fondamental pour l'océanologie et la climatologie.

[4] J.M. Janin, X. Blanchard. Simulation des courants de marée en Manche et proche Atlantique. - Rapport final - EDF HE-42/92.58.

[5] Tidal Flow Forum. 6th International Conference on Computational Methods in Water Resources. Adv. in Water Resources, 1987, Vol.10.

[6] P. Willis, C. Boucher. Connection of the two levelling system datum IGN69 et ODN through the Channel by using GPS and other techniques. IGN/SGN n° 27.505.

[7] P. Willis, C. Boucher. Rattachement de marégraphes au système géodésique mondial BTS par les systèmes GPS et DORIS. IGN/SGN n° 27.486.

[8] J.F. Lomer. La dérive dans la mer à marée. Thèse de l'université Paris VI, 1978.

[9] J.C. Salomon, M Breton. Courants résiduels de marée dans la Manche. *Oceanologica Acta*, special issue n°11, Décembre 1991.