

MODELES MATHEMATIQUES DE COURANTS RESIDUELS SUR LE PLATEAU CONTINENTAL NORD
EUROPEEN

S. DJENIDI, J.C.J. NIHOUL et F. RONDAY
GHER, Université de Liège
Laboratoire de Mécanique

B6 Sart Tilman
B4000 Liège.

A. GARNIER
Association EUR/CEA,
dépt. de Protection sanitaire
Institut de protection et de sûreté
nucléaires, B.P. 6
92260 Fontenay-aux-Roses.

INTRODUCTION

Les processus à méso-échelle tels que les marées et les courants transitoires induits par le vent sont de loin les plus intenses dans les mers continentales. Leur temps caractéristique s'étend de quelques heures à quelques jours et les courants qui leur sont associés peuvent largement dépasser des vitesses d'un mètre par seconde.

Cependant, les biologistes et les chimistes sont beaucoup plus intéressés par les phénomènes à macro-échelle qui ont des temps caractéristiques typiques des processus écologiques (de quelques semaines à quelques mois).

L'importance des marées et des tempêtes pour la production de turbulence et pour le mélange des propriétés marines est évidemment considérée comme essentielle par les biologistes, mais beaucoup d'entre eux seraient déjà satisfaits d'une grossière paramétrisation de l'efficacité du mélange turbulent et d'une description générale de ce transport à long terme des masses d'eau qu'on appelle souvent "*circulation résiduelle*".

Mis à part les courants dus aux différences de densité, que nous n'envisageons pas ici et qui ne sont appréciables que dans les régions où les gradients de température et surtout de salinité sont importants, on peut considérer que les courants résiduels présents dans des bassins continentaux peu profonds tels que la mer du Nord et les mers adjacentes, sont principalement générés et entretenus par trois causes.

Celle qui paraît être prédominante au vu de ses effets à méso-échelle est sans doute la marée, surtout par le truchement de la composante semi-diurne lunaire (M_2) qui joue un rôle essentiel dans la région étudiée. Si on fait abstraction des autres composantes ainsi que des conditions météorologiques, une moyenne sur une période de l'ordre du jour suffit pour éliminer l'effet transitoire de la marée et ne laisser ainsi que le résidu généré par ses interactions non linéaires : *c'est la circulation résiduelle de marée*.

La circulation résiduelle régionale est influencée par la circulation résiduelle globale c'est-à-dire la composante quasi stationnaire des écoulements pénétrant aux frontières.

Les modèles d'inflow-outflow ont montré que les flux aux frontières jouent un rôle important dans le calcul de la dérive à long terme des masses d'eau en ce sens qu'ils arrivent à reproduire les grandes tendances de celle-ci, et qu'à ce titre les conditions aux limites peuvent être considérées comme l'un des trois "forcings" de la circulation résiduelle (Nihoul et Runday, 1976).

La superposition des effets du vent à ceux de la marée donne lieu à des surcotes et à des modifications courantométriques qui peuvent être si importantes lors de conditions météorologiques sévères qu'il est impensable de négliger l'impact des *forces atmosphériques* sur la dérive à long terme des masses d'eau.

Malheureusement, à l'inverse de la marée qui a un comportement cyclique aisément prévisible, le champ éolien est caractérisé par une irrégularité et une complexité qui rendent délicate la prise en compte de cet effet.

Une circulation résiduelle obtenue par moyenne sur une période de l'ordre de quelques semaines, avec une succession d'événements météorologiques typiques d'une saison semble être la plus significative parce qu'elle présente un caractère "climatique" tout en reflétant la variabilité atmosphérique. Elle reste néanmoins difficile à déterminer à cause de la longueur des périodes à simuler.

Une manière d'éviter ce problème consiste en l'utilisation d'un vent moyen sur deux ou trois cycles de marée. Mais considérer une moyenne sur une période équivalente à celle du résiduel "tidal" n'est fiable que dans le cas d'une situation atmosphérique remarquablement persistante. En effet, si le vent obtenu par moyenne de conditions météorologiques réelles très variables peut donner des résultats valables dans les grandes lignes, il risque cependant de ne pas produire les effets de certains événements intenses qui ont été éliminés ou amoindris par le processus de moyenne, et de "lisser" en quelque sorte la circulation "climatique" associée qu'on veut approcher.

La circulation résiduelle étant implicitement incluse dans les équations dépendantes du temps de la circulation transitoire, il serait tentant de résoudre ces équations et de faire la moyenne de la solution transitoire pour obtenir les courants résiduels.

Sur le plateau continental nord européen, la large prédominance des mouvements à méso-échelle fait en sorte que les courants résiduels sont du même ordre de grandeur que l'erreur sur les courants transitoires calculés par un modèle ou mesurés à l'aide de courantomètres. Pour cette raison, il est plus correct de moyennner, non pas la solution, mais les équations elles-mêmes, sur un temps T suffisamment long pour éliminer les phénomènes transitoires.

Cette moyenne introduit des termes supplémentaires - *les tensions de Reynolds à méso-échelle* - dus aux non linéarités des équations, une forme paramétrisée de ces termes constituant la contribution des méso-échelles dans les équations de la circulation résiduelle. Ces équations sont indépendantes du temps à cause de la quasi stationnarité du phénomène (Nihoul et Roday 1975 et 1976, Nihoul et al. 1979, Nihoul 1980, Nihoul et Runfola 1981).

Dans cette optique, la résolution des équations stationnaires moyennes qui décrivent la circulation résiduelle exige la prescription, le long des frontières du modèle, de *conditions aux limites* adaptées aux échelles de temps et aux conditions météorologiques considérés.

Les conditions - élévations ou vitesses résiduelles - sont néanmoins difficiles à obtenir à cause du fait que, d'une part les instruments ne sont pas spécialement conçus pour mesurer des grandeurs résiduelles et que, d'autre part, l'importance des frontières en mer ouverte ne permet pas l'établissement d'un réseau expérimental suffisamment dense; de plus, les séries temporelles de données doivent être de longue durée pour tenir compte des fluctuations saisonnières des phénomènes.

Dans la suite, une application au plateau continental nord européen essaiera d'illustrer ces considérations en montrant les effets respectifs des différents moteurs de la circulation résiduelle que sont la marée, le vent et les conditions aux limites.

Le modèle mathématique

Comme précisé dans l'introduction, la circulation résiduelle est calculée selon la méthode des "tensions de Reynolds à méso-échelle" (TRME). La quasi-homogénéité de la colonne d'eau, due aux faibles profondeurs et à l'intensité du brassage par les marées et les tempêtes, permet d'intégrer les équations de mouvement sur la verticale et de ne plus considérer alors que le champ de vitesses moyennes horizontales.

Faisant la moyenne temporelle des équations de Navier-Stokes, négligeant les dérivées par rapport au temps et passant au rotationnel par l'adoption du formalisme de la fonction de courant, on arrive à l'équation (Ronday 1976, Nihoul 1982) :

$$K \nabla^2 \psi + \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{K}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{f}{h} \right) \right] + \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{K}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{f}{h} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\theta_2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\theta_1}{h} \right)$$

où ψ est la fonction de courant

θ_1 et θ_2 sont les composantes de $\theta = C (\mathbf{w} \parallel \mathbf{w} \parallel)_0 + \tau_t$

τ_t est le terme de TRME $\tau_t = - [g \zeta_1 \nabla \zeta_1 + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1}{H} \right) + \frac{D}{H^2} \mathbf{u}_1 \parallel \mathbf{u}_1 \parallel]_0$

\mathbf{u} est le transport horizontal

ζ est l'élévation de la surface libre

H est la profondeur instantanée $H = h + \zeta$

\mathbf{w} est la vitesse du vent

D et C sont des coefficients de friction sur le fond et à la surface libre

$K = \frac{D}{h} \parallel \mathbf{u}_1 \parallel_0$ est un nouveau coefficient de friction

f est le paramètre de Coriolis.

L'indice $_0$ indique une moyenne sur l'intervalle de temps choisi pour éliminer les contributions transitoires, une grandeur pouvant s'écrire sous la forme

$$x = x_0 + x_1 \quad \text{avec} \quad (x)_0 = x_0 \quad \text{et} \quad (x_1)_0 = 0.$$

Application au plateau continental nord européen

La grille du modèle numérique couvre la mer du Nord, le Skagerrak, la Manche, la mer Celtique et la mer d'Irlande. La frontière du côté Atlantique est déterminée par l'isobathe de 200 mètres (figure 1.). Pour tenir compte de manière réaliste de la faible largeur de certains détroits tels que le Pas de Calais et le North Channel, une maille de petite dimension est nécessaire. La finesse de la maille (10' x 10') permet non seulement de mieux épouser la géométrie de la côte, mais aussi une meilleure représentation de la topographie du fond; cette amélioration revêt une grande importance dans le calcul des gradients de profondeurs qui interviennent dans le modèle mathématique.

Vu le formalisme utilisé pour traiter le problème de la circulation résiduelle (équation elliptique en termes de fonction de courant), il faut fournir les valeurs de ψ le long d'une frontière ouverte; la côte étant une ligne de courant on peut y imposer $\psi = \text{cte}$ ou $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$.

Dans l'introduction, la difficulté d'obtenir des données significatives et en nombre suffisant a été évoquée, ce fait constituant une des limitations à l'applicabilité des modèles de circulation résiduelle.

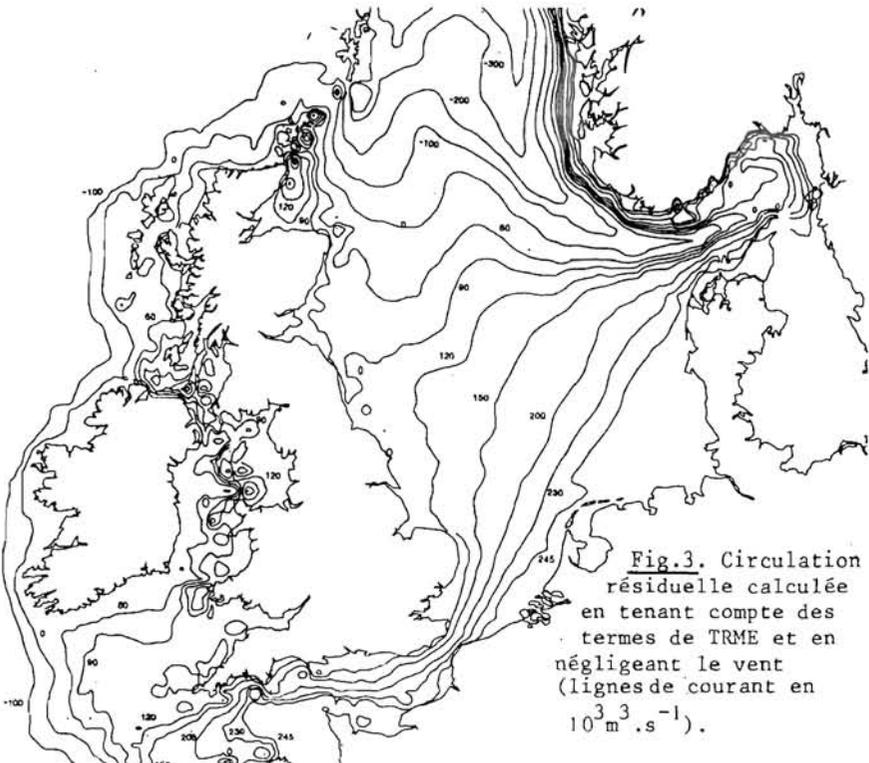
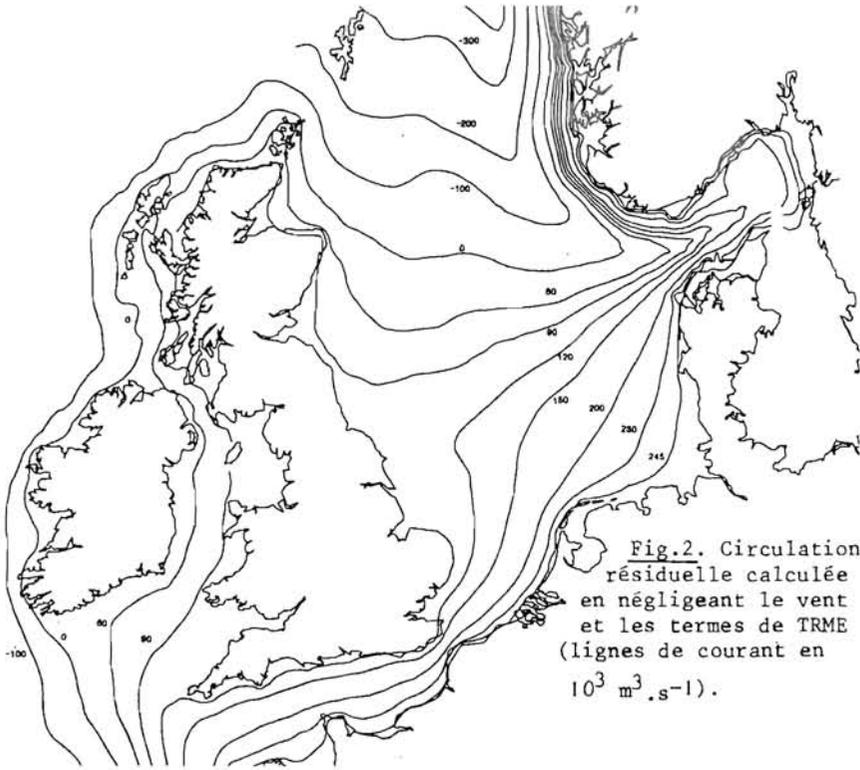


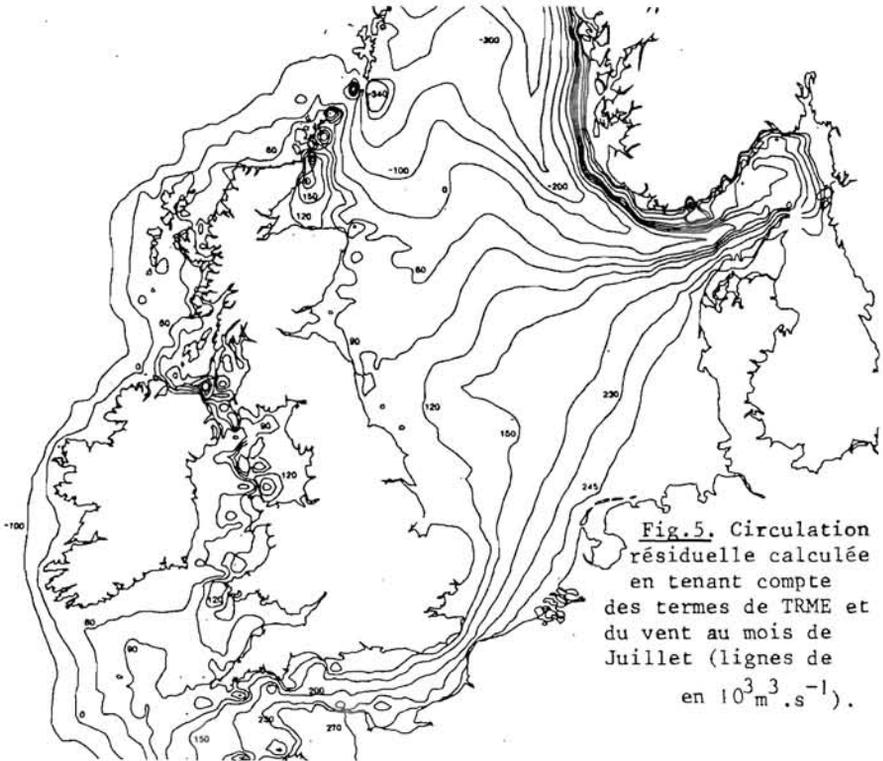
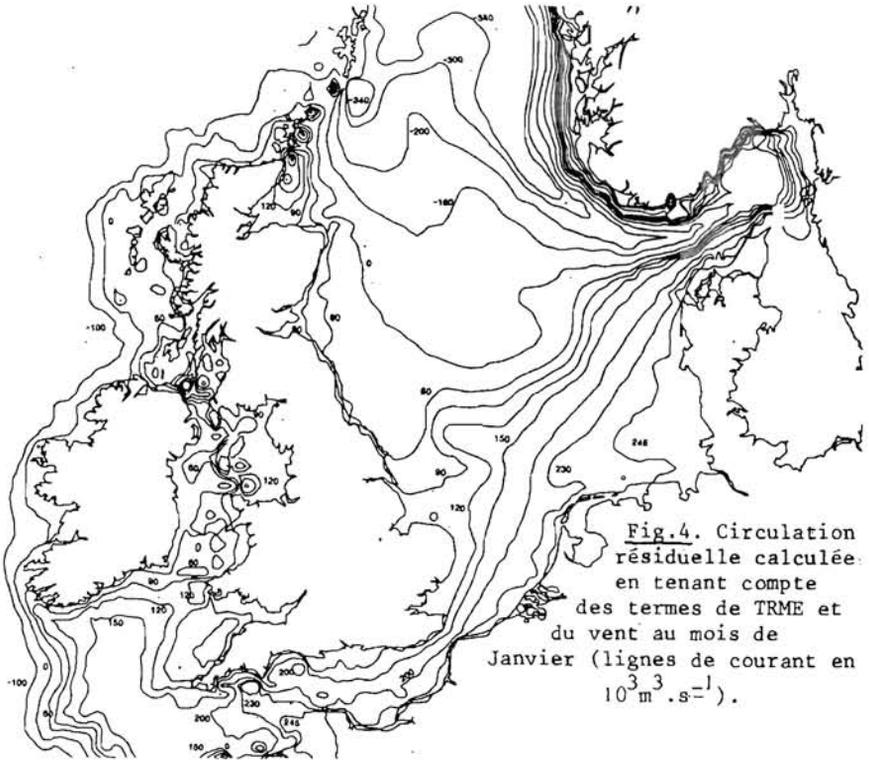
Fig.1.: Grille numérique pour le Plateau Continental Nord-Européen.

La compilation de données de courants, de salinités et de concentrations en césium 137 disponibles dans la littérature (Tulloch and Tait, 1959; CEA-NRPB report, 1979; Bowden, 1980; Pingree, 1980; Kautsky and Murray, 1981; Jefferies and al, 1982; ICES report, 1983; Otto, 1983; Ellet and Mac Dougall, 1984), a néanmoins permis d'estimer des valeurs moyennes pour les flux aux frontières (Djenidi et al, 1985).

Si on néglige les termes de TRME, ce qui revient à ignorer les interactions non linéaires des marées et des tempêtes et à considérer que la circulation résiduelle n'est principalement forcée que par les échanges avec l'Atlantique, on obtient le schéma de circulation de la figure 2. Il représente les grandes lignes de la dérive des masses d'eau induite par les deux branches du courant Nord Atlantique mais ne fait pas apparaître la structure fine et les écoulements secondaires révélés par les observations (Beckers et al, 1976; Zimmerman, 1976; Riepm, 1977; Prandle, 1978).

La prise en compte des termes de TRME, calculée à partir des résultats d'un modèle de marée (Djenidi et al, 1985), montre par contre une circulation beaucoup moins "lisse" associée à des méandres et des gyres, surtout dans les régions à géométrie tourmentée et à forts gradients de profondeurs (Manche, Mer d'Irlande, ...) où la contrainte de marée joue un rôle important (figure 3).





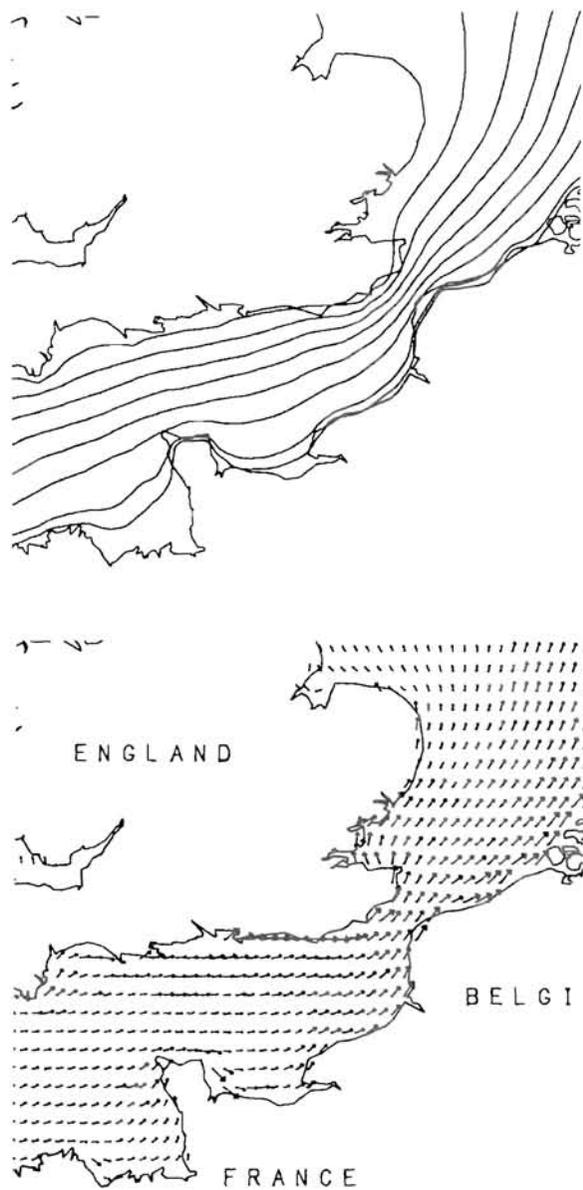


Fig. 6. : Circulation résiduelle sans vent et sans TRME

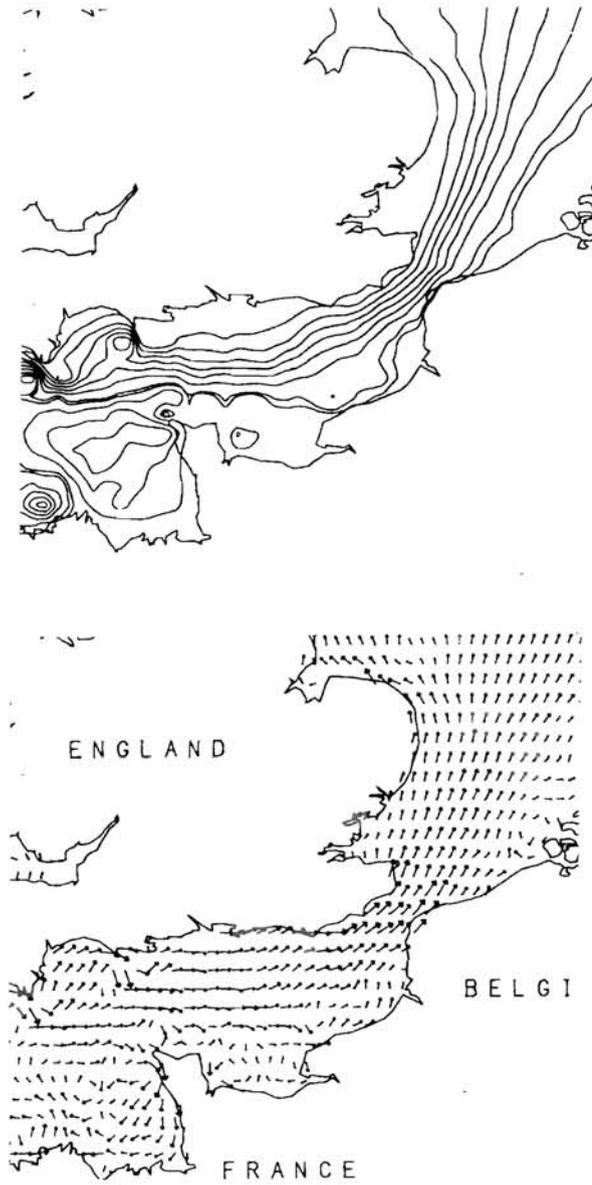


Fig. 7. : Circulation résiduelle sans vent et avec TRME

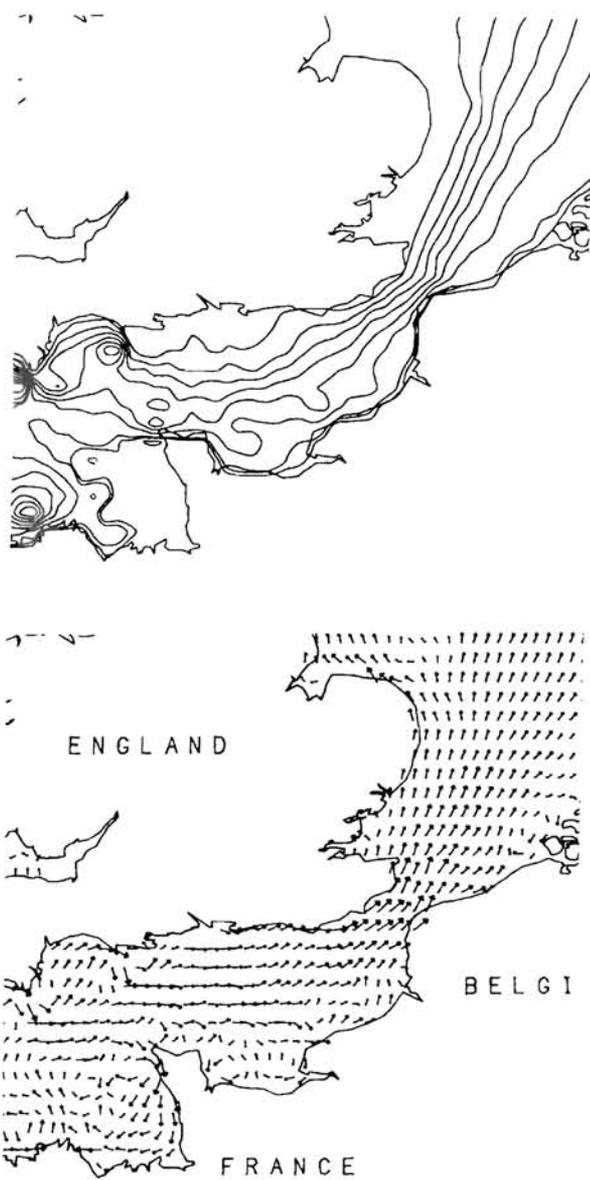


Fig. 8. : Circulation résiduelle avec TRME et avec vent d'hiver



Fig. 9. : Circulation résiduelle avec TRME et avec vent d'été

Pour mettre en évidence les effets du vent, deux situations météorologiques typiques des saisons d'hiver et d'été ont été sélectionnées. Les champs éoliens utilisés sont ceux des mois de janvier et juillet 1976 donnés par le modèle atmosphérique de l'Impérial Collège de Londres (vents géostrophiques toutes les trois heures aux noeuds d'une grille de $1^\circ \times 1^\circ$). Nous nous sommes intéressés à la circulation résiduelle "climatique" décrite dans l'introduction mais, par souci d'économie de calculs sur ordinateur (rappelons qu'il est nécessaire de simuler la circulation à méso-échelle durant toute la période considérée afin de pouvoir calculer les termes de TRME correspondants), nous nous sommes limités à la borne inférieure de l'échelle de temps du phénomène, soit à des périodes d'une semaine. La difficulté d'obtenir des conditions aux limites qui correspondent aux événements de ces périodes nous obligent à utiliser les mêmes flux aux frontières que précédemment.

Les figures 4 et 5 qui représentent les deux cas étudiés montrent comment les conditions météorologiques modifient, en mer du Nord, l'évolution des deux branches du courant nord-atlantique entrant par la Manche et entre la Norvège et l'Ecosse. On peut également constater, d'une situation à l'autre, que la localisation et l'extension des structures tourbillonnaires résiduelles sont nettement perturbées en Mer du Nord, en Manche et en Mer Celtique, alors qu'elles restent peu affectées en Mer d'Irlande. Il apparaît aussi que la situation d'été se rapproche sensiblement de celle où les conditions atmosphériques sont négligées.

Malgré la grande étendue de la zone étudiée et grâce à la finesse de la grille utilisée, il est possible de détecter, dans les régions de plus faible emprise telles que la Manche et la baie sud de la Mer du Nord, des caractéristiques relativement précises de la circulation.

Par exemple, sur les figures 6 à 9 on représente de manière plus détaillée la courantométrie dans cette partie du plateau continental (un réseau plus dense de lignes de courant a été adopté pour mieux mettre en évidence certaines structures qui n'étaient pas apparentes dans les figures 2 à 5). L'examen de ces figures permet de mieux souligner les remarques précédentes sur le rôle respectif des éléments moteurs de la circulation résiduelle.

BECKERS, O., NIHOUL, J.C.J. and WOLLAST, R., 1976, La circulation résiduelle et la caractérisation des masses d'eau dans la zone belge, In : J.C.J. Nihoul (Editor), Modélisation des systèmes marins. *Projet Mer, Rapport final*, Services du Premier Ministre, Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, 1976, 1 : 95-130

BOWDEN, K.F., 1980, Physical and Dynamical Oceanography of the Irish Sea, in The North West European Shelf Seas : the Sea Bed and the Sea in Motion II : Physical Resources, Elsevier Ocean Serie, 24 B, Banner et al. Eds, 391-414

CEE, 1979, Commission des Communautés Européennes, Méthodologie pour l'évaluation des conséquences radiologiques des rejets d'effluents radioactifs en fonctionnement normal, Rapport CEA - NRPB, Doc V/3865/79 - FR - EN

DJENIDI, S., RONDAY, F., BECKERS, Ph. and PIRLET, A., 1985, Etude de la circulation résiduelle en vue de l'évaluation de la dispersion d'effluents radioactifs dans l'environnement marin (Plateau Continental Nord-Européen), Rapport SC - 012 - B/BIAF/423 - F (SD)/DN01, Commissariat à l'Energie Atomique, 107 pp.

- ELEET, D.J. and Mc DOUGALL, N., 1984, Quelques résultats d'observations effectuées à l'ouest de la Grande Bretagne, Vol. 1, Séries temporelles de mesures océaniques (1983), C.O.I. Unesco Paris, 21 - 25
- I.C.E.S., 1983, Flushing times of the North Sea, Int. Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, Août 1983, Rapp. n° 123
- JEFFERIES, D.F., STEELE, A.K. and PRESTON, A., 1982, Further studies on the distribution of 137 Cs in British Coastal Waters, I : Irish Sea, Deep Sea Res., Vol. 29, n° 6 A, 713 - 738
- KAUTSKY, H. and MURRAY, C.N., 1981, Artificial radioactivity in the North Sea, Revue de l'Energie Atomique, Vienne (Autriche), Suppl. 2, 63 - 105
- NIHOUL, J.C.J., 1980, Residual circulation, long waves and mesoscale eddies in the North Sea, Oceanologica Acta, H3 : 309 - 316
- NIHOUL, J.C.J., 1982, Hydrodynamic models of shallow continental seas, Etienne Riga Edit., 198 pp.
- NIHOUL, J.C.J. and RONDAY, F., 1975, The influence of the tidal stress on the residual circulation, Tellus, 29, 484 - 490
- NIHOUL, J.C.J. and RONDAY, F.C., 1976, Hydrodynamic models of the North Sea, Mémoires Société Sc. Lg., 10 : 61 - 96
- NIHOUL, J.C.J., RUNFOLA, Y. and ROISIN, B., 1979, Non-linear three-dimensional modelling of mesoscale circulation in seas and lakes, in Marine Forecasting, J.C.J. Nihoul (Ed.), Elsevier Publ. Co, Amsterdam, 235 - 259
- NIHOUL, J.C.J. and RUNFOLA, Y., 1981, The residual circulation in the North Sea, In : J.C.J. Nihoul (Ed.), Ecohydrodynamics, Elsevier, Amsterdam, 219 - 271
- OTTO, L., 1983, Currents and water Balance in the North Sea, in North Sea Dynamics, Springer Verlag, Sundermann et Lenz Eds, 26 - 43
- PINGREE, R.D., 1980, Physical Oceanography of the Celtic Sea and English Channel, in the North-West European Shelf Seas : the Sea Motion II : Physical Chemical Oceanography, and Physical Resources, Elsevier Ocean. Series, 24 B, 415 - 466
- PRANDLE, D., 1978, Residual flows and elevations in the southern North Sea, Proc. Roy. Soc. London, A359, 189 - 228
- RIEPMAN, H., 1977, Spatial variability of residual currents in an area of the Southern North Sea, ICES hydrography Committee, CM 1977/C : 43, 7 pp.
- RONDAY, F., 1976, Modèles hydrodynamiques, Modélisation des systèmes marins, Projet Mer, Rapport Final, J.C.J. Nihoul (Editor), Services du 1er Ministre, Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, Vol. 3, 270 pp.
- TULLOCH, D.S. and TAIT, J.B., 1959, Hydrography of the North-Western Approaches of the British Isles, Mar. Res. Scotland, 1, 32 pp.
- ZIMMERMAN, J.T.F., 1976, Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, II, Neth. J. Sea Res., 10, 397 - 439