

COURANTOMETRIE EN BAIE DE SEINE : COMPARAISON D'UNE MODELISATION NUMERIQUE ET DE MESURES PAR RADAR.

BROCHE P.*, SALOMON J.C.**, de MAISTRE J.C.*, DEVENON J.L.*.

Les modèles bidimensionnels de courant de marée sont de plus en plus utilisés pour obtenir une description de la circulation dans les zones côtières. Ils résolvent les équations de l'hydrodynamique à partir de conditions initiales sur tout le domaine et de conditions aux limites qui portent le plus souvent sur des hauteurs d'eau. L'imprécision des conditions sur les frontières ouvertes et les approximations inhérentes aux processus mathématiques d'intégration et à la modélisation physique de certains phénomènes (frottement, turbulence), amènent à attacher une attention particulière à la validation de ces modèles. Les radars décimétriques cohérents (ou radars HF Doppler) constituent une technique de courantométrie qui paraît bien adaptée à cette finalité : les mesures que l'on en obtient ont en effet des échelles d'intégration spatiale et temporelle comparables à celles des modèles, et leur couverture spatiale étendue (les mesures sont effectuées simultanément en plusieurs dizaines de points) donne à la comparaison une généralité originale.

Cette communication décrit les résultats d'une telle comparaison effectuée à propos de la partie occidentale de la Baie de Seine.

1. MODELISATION NUMERIQUE DES COURANTS DE MAREE.

Le modèle utilisé (Salomon *et al.*, 1980; Mariette *et al.*, 1982) est un modèle bidimensionnel en plan horizontal, traité par un procédé de différences finies dont le pas d'intégration temporelle est de 5 minutes et le pas de discrétisation spatiale de 2 km. Il est piloté par des conditions de niveau issues de l'atlas des composantes de marée en Manche, telles qu'elles ont été observées sur un modèle physique tournant (Chabert *et al.*, 1978). Sept points sont utilisés sur la ligne Barfleur-Antifer, entre lesquels il est procédé à des interpolations. C'est un modèle de prédiction, qui ne fait appel à aucune mesure directe relative à la période et à la zone concernées. Une présentation plus détaillée en est donnée dans une autre communication à ce Colloque (Salomon, 1985).

2. MESURES PAR RADAR.

Dans la gamme décimétrique (typiquement pour une fréquence $f=10$ MHz, de longueur d'onde $\lambda=30$ m), l'écho radar provient de la rétrodiffusion cohérente sur les vagues de longueur d'onde $\lambda/2$ qui se propagent dans la

* Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (LSEET), Université de Toulon, 639, Bd. des Armaris, 83100 Toulon (CNRS UA 705).

** Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne Occidentale, 6, Avenue Le Gorgeu, 29000 Brest (CNRS UA 712).

direction du faisceau radar. Leur vitesse est sensible à l'action du courant : la théorie montre qu'elle subit une modification égale à la projection dans leur direction de propagation de la vitesse du courant à la profondeur $\lambda/8\pi$, soit 1,25 m à la fréquence $f=10$ MHz. La mesure de l'effet Doppler de l'écho (ou, plus précisément, le traitement de son spectre de fréquence, cf. Broche et al., 1983) permet ainsi la mesure de la composante parallèle au faisceau radar de la vitesse du courant à cette profondeur. L'usage de deux radars couvrant simultanément le même site sous deux angles de visée différents permet d'obtenir le vecteur courant complet.

Pour l'étude réalisée en Baie de Seine, les deux radars ont été installés à Lestre (Manche) et Grandcamp-Maisy (Calvados). Leurs caractéristiques techniques ont permis d'explorer, dans le domaine concerné par le modèle décrit ci-dessus, 20 points de mesure depuis Lestre (sur 6 azimuts et à 4 distances) et 6 points depuis Grandcamp (sur 2 azimuts et à 3 distances) (figure 1).

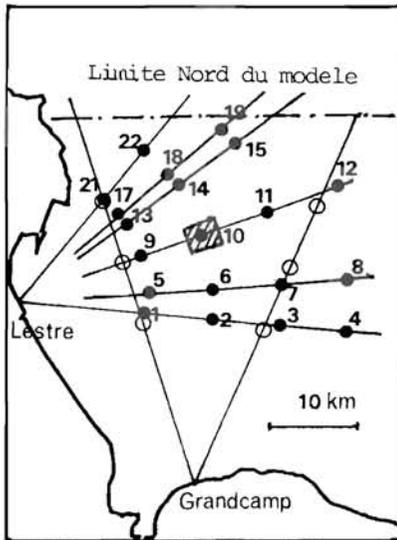


Figure 1 - Localisation des radars et des cellules sondées par chacun d'eux. Un exemple illustrant l'extension de chaque cellule est donné pour la cellule n° 10.

L'écho analysé provient en fait d'une portion finie de la surface de la mer ("cellule de mer") dont l'étendue, fonction des caractéristiques des radars et de la distance à chaque station, est de l'ordre d'une dizaine de km^2 . Le temps d'intégration nécessaire à une mesure est d'autre part de quelques minutes. Ces deux échelles d'intégration sont tout à fait comparables à celles du modèle. La précision des mesures dépend de la durée d'intégration et de la variabilité spatiale et temporelle du courant. Elle a pu être estimée théoriquement et évaluée directement à partir des résultats expérimentaux. Les deux méthodes donnent des valeurs concordantes, variant de 3 à 7 cm/s suivant la localisation de la cellule (les valeurs les plus grandes sont obtenues près de la côte) et suivant l'importance de la marée (cf. Broche et al., 1984).

L'expérience s'est déroulée pendant une période d'une vingtaine de jours en septembre-octobre 1982, dans laquelle on a sélectionné, pour la comparaison, les journées des 27 et 30 septembre et 2 octobre, qui correspondent respectivement à des marées faible, moyenne et forte.

3. COMPARAISON DES RESULTATS.

Une première comparaison qualitative est obtenue en reportant sur un même graphique les variations des mesures de vitesse radiale par le radar, $r(t)$, et des valeurs fournies par le modèle, $m(t)$. Quelques exemples sont donnés sur la figure 2. On constate des cas où l'accord est presque parfait, et des cas où existent des différences significatives d'amplitude ou de phase.

Pour procéder à une étude plus quantitative, on doit d'abord effectuer sur l'ensemble des données, r et m , un filtrage des composantes résiduelles de très basse fréquence, puisque le modèle ne prend en compte que les effets de la marée, alors que les mesures incluent les effets de tous les mécanismes possibles, et notamment ceux du vent (courant d'Ekman et dérive de Stokes).

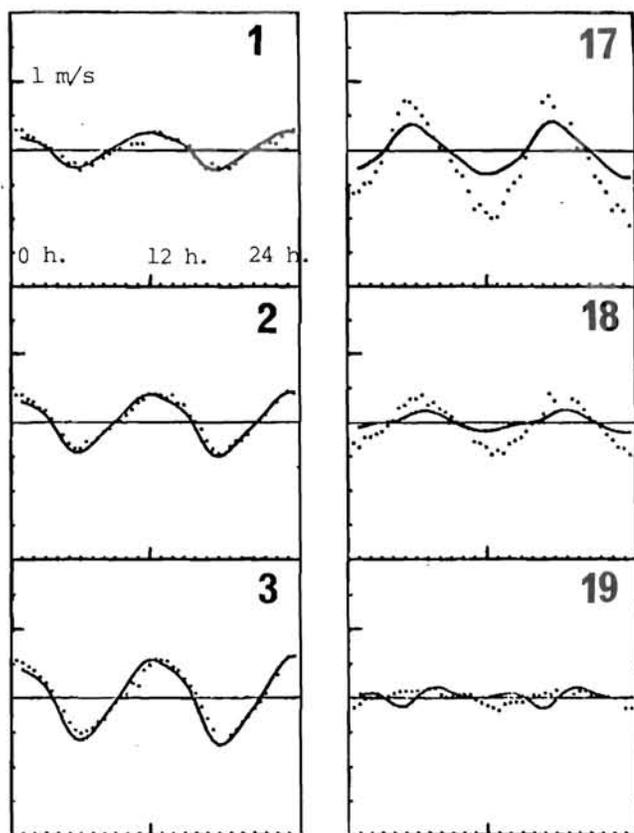


Figure 2 - Exemples de séries temporelles des composantes radiales de la station de Lestre, obtenues du modèle (trait plein) et des mesures (pointillés). Ces résultats se rapportent au 30 septembre, et aux cellules repérées par leur numéro (en haut à droite de chaque graphique, cf figure 1).

On peut alors :

(i) calculer l'écart quadratique moyen σ entre les deux séries temporelles r et m , donné par :

$$\sigma^2 = \langle (r(t) - m(t))^2 \rangle$$

Pour un tiers des cellules cet écart est inférieur au double de l'incertitude (intervalle de confiance à 95% dans l'hypothèse gaussienne) sur r , donc pratiquement non significatif. C'est d'autre part au voisinage de la côte qu'il est le plus important.

(ii) comparer les amplitudes et phases des composantes spectrales des séries $r(t)$ et $m(t)$ à la fréquence des modes de marée; compte-tenu de la durée limitée des données, l'analyse spectrale est effectuée par une méthode de moindres carrés qui optimise l'écart entre chaque série et une fonction sinusoïdale de période égale à la période du mode semi-diurne dominant (12,4 heures). Comme il est impossible de discriminer entre les modes M2 et S2, l'amplitude est en fait celle qui résulte de leur battement, elle varie donc comme le coefficient de marée. Les résultats obtenus pour la station de Lestre sont illustrés sur la figure 3.

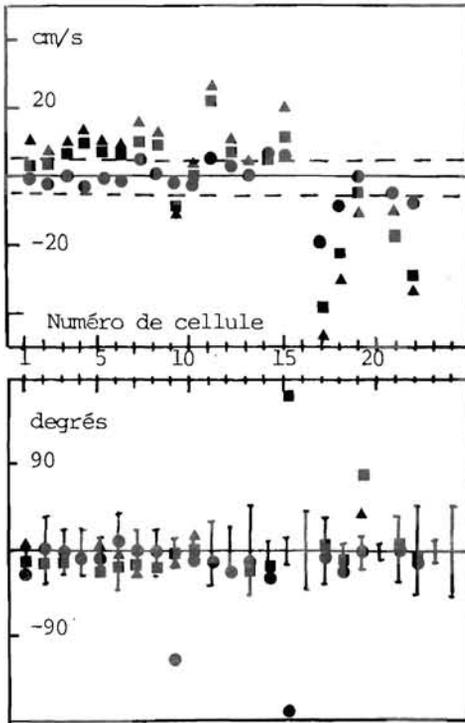


Figure 3 - Différences d'amplitude et de phase entre les composantes semi-diurnes des vitesses radiales données par le modèle et par les mesures, dans les différentes cellules repérées par leur numéro. Les dates correspondantes sont respectivement le 27 septembre (cercles), le 30 septembre (carrés), et le 2 octobre (triangles). Les intervalles reportés sur ces tracés correspondent au double de l'incertitude d'origine expérimentale (pour l'amplitude, seule une valeur moyenne a été reportée).

Les aspects les plus significatifs en sont les suivants :

- l'importance de l'écart en amplitude croît avec l'intensité de la marée; les écarts observés le 27 septembre sont presque tous inférieurs à 5 cm/s, alors qu'ils atteignent 10 cm/s le 30 et dépassent cette valeur le 2 octobre.
- lorsqu'ils sont supérieurs à l'incertitude liée aux mesures, les écarts présentent un caractère systématique, conservant, en une cellule donnée, le même signe : le modèle conduit à des vitesses supérieures aux mesures dans la plupart des cellules, excepté dans celles qui correspondent aux deux azimuts les plus au Nord.
- les écarts observés le 30 septembre et le 2 octobre sont pratiquement du même ordre de grandeur que l'écart quadratique moyen observé précédemment, ce qui montre bien que cet écart est dû pour une faible part seulement aux incertitudes sur r , et pour l'essentiel à une différence systématique d'amplitude entre r et m .
- la différence de phase, de une à quelques dizaines de degrés, est du même ordre de grandeur que l'incertitude attachée à l'analyse de r , et donc non significative. Les quelques exceptions concernent des cellules où la composante radiale a une amplitude voisine de zéro : une faible différence dans les valeurs peut se traduire par un changement de signe, donc une variation de phase de 180° .

(iii) comparer les vecteurs courant aux 6 cellules couvertes par la station de Grandcamp, où, par interpolation des données de Lestre, les deux composantes cartésiennes ont pu être obtenues avec une précision de l'ordre de 10 cm/s. La comparaison porte sur les paramètres des ellipses de marée obtenues des radars et du modèle (figure 4).

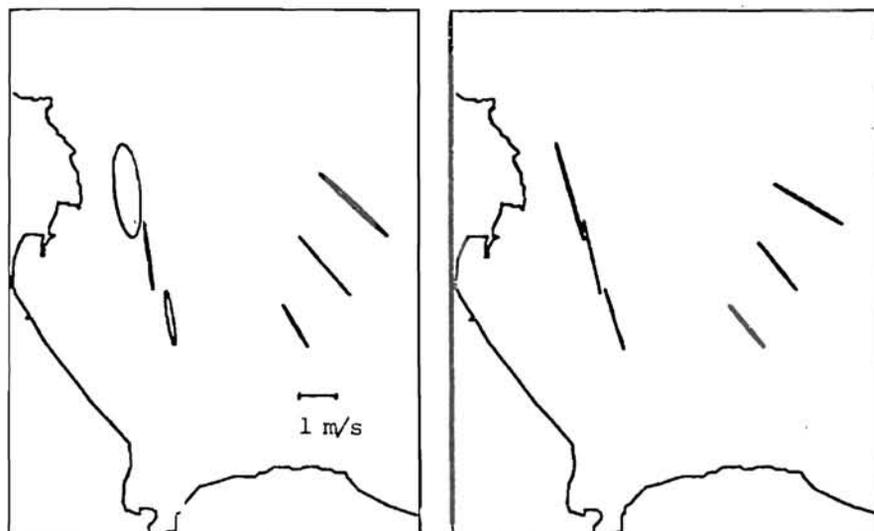


Figure 4 - Exemples d'ellipses de marée obtenues des mesures (à gauche) et du modèle (à droite) dans les 6 cellules couvertes par le radar situé à Grandcamp. Cette figure se rapporte au 2 Octobre.

Les principaux résultats sont les suivants :

- la direction des ellipses s'accorde à mieux que 10° près, et même à mieux que 5° près dans 2/3 des cas.
- le courant maximum s'accorde à mieux que 10 cm/s dans la moitié des cas.
- le courant minimum est inférieur à l'incertitude correspondante, et donc cohérent avec ce que donne le modèle (ellipses réduites à des segments), excepté au point le plus voisin du Cotentin.

4. DISCUSSION.

Les échelles d'intégration en profondeur sont différentes pour les deux procédés (environ 1.25 mètre pour le radar, aux fréquences voisines de 10 MHz qui ont été utilisées, toute la profondeur d'eau pour le modèle). Toutefois, pour des courants de marée qui varient peu avec la profondeur sauf très près du fond, cette influence est probablement mineure et, les échelles d'intégration spatiale et temporelle étant au contraire du même ordre de grandeur, les différences observées traduisent essentiellement l'effet cumulé des incertitudes des deux méthodes. Deux types de différence sont en fait observés :

(i) sur l'essentiel de la zone, le modèle paraît surestimer d'au plus une dizaine de cm/s l'amplitude du mode semi-diurne, sans déphasage significatif. Il arrive que cet écart soit supérieur à la seule incertitude d'origine

expérimentale. La différence ainsi mise en évidence chiffre la précision du modèle, qui est de quelques cm/s à une dizaine de cm/s, du même ordre que celle des procédés courantologiques classiques. Plusieurs causes contribuent à cette limitation : l'imprécision sur les conditions aux limites, la discrétisation de la description du domaine (bathymétrie et tracé des côtes), la modélisation du frottement et de la viscosité latérale.

(ii) près de la pointe de Barfleur, un écart important se manifeste à la fois sur la composante radiale de Lestre et sur le vecteur courant. Modèle et mesures par radar s'accordent pour indiquer qu'il existe dans cette zone un fort gradient horizontal de courant. Cette situation est défavorable à la fois aux mesures de composantes radiales (le courant est très inhomogène à l'intérieur des cellules de mer), et à la reconstitution du vecteur courant (la procédure d'interpolation linéaire qui est utilisée peut être mise en question). La différence observée traduit en somme la limitation de la résolution des radars, par la dimension des cellules et par la distance qui les sépare : des gradients trop importants à l'échelle de ces résolutions ne peuvent pas être rendus. C'est aussi dans cette zone que les incertitudes propres au modèle sont les plus importantes (proximité de la côte, de la frontière ouverte, ...).

La comparaison présentée porte sur une étendue totale de plusieurs centaines de km². Partout où la résolution des radars est suffisante à l'échelle des gradients de courant que l'on peut rencontrer, on a obtenu un accord convenable entre les résultats des mesures et ceux du modèle, dont la précision a pu ainsi être estimée.

L'utilisation des radars HF apparaît, à la lumière de ces résultats, comme un outil très positif pour une validation globale des modèles numériques de circulation côtière. Des progrès dans la résolution apparaissent souhaitables pour l'étude des régions de fort gradient. On peut enfin envisager le développement de méthodes d'optimisation dans lesquelles les modèles intégreraient, avec un poids adapté à leur précision, les mesures, de façon à ajuster certains paramètres difficiles à modéliser a priori.

Broche P., J.C. de Maistre, P. Forget (1983) - Mesure par radar décimétrique cohérent des courants superficiels engendrés par le vent. Oceanologica Acta, Vol. 6, n° 1.

Broche P., J.C. de Maistre, J.L. Devenon (1984) - Courantométrie par radar HF en Baie de Seine. Rapport Scientifique CNEOX.

Chabert d'Hières G., C. Le Provost (1978) - Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. Annales hydrographiques, Vol. 6, n° 3.

Mariette V., G. Rougier, J.C. Salomon, B. Simon (1982) - Courants de marée en mer d'Iroise. Oceanologica Acta, Vol. 5, n° 2.

Salomon J.C., P. Le Hir (1980) - Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Rapport Scientifique UBO/CNEOX.

Salomon J.C. (1985) - Courantologie de marée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2