



## **TRANSMER, un modèle hydrodynamique rapide et précis pour la simulation à moyen et long terme des transferts de radionucléides en Manche et dans le sud de la Mer du Nord**

Pascal Bailly du Bois <sup>a</sup>, Franck Dumas <sup>b</sup>

<sup>a</sup>  
*Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville  
(IRSN/DEI/SECRE/LRC), pascal.bailly-du-bois@irsn.fr*

<sup>b</sup>  
*IFREMER/DEL Applications Opérationnelles, fdumas@ifremer.fr*

### **Résumé**

Le modèle hydrodynamique TRANSMER permet de simuler la dispersion de substances dissoutes dans l'eau de mer en Manche et dans le sud de la Mer du Nord avec un pas d'espace d'un kilomètre et un pas de temps de 30 minutes. Il a été validé qualitativement et quantitativement par 1400 mesures de <sup>125</sup>Sb en solution. Ce modèle permet de simuler les conséquences à moyen et long terme de rejets de polluants solubles dans l'écosystème marin, dans des situations normales ou accidentelles et avec des temps de calcul très faibles (moins d'une heure de calcul par année de simulation)

### **Abstract**

TRANSMER hydrodynamic model simulates dispersion of dissolved substances in seawater at the scale of the English Channel and the south of the North Sea with a mesh size of one kilometre and a time step of 30 minutes. It has been qualitatively and quantitatively validated by 1400 measurement of <sup>125</sup>Sb in seawater. This model evaluates the medium- and long-term consequences of releases of soluble pollutants in the marine ecosystem under normal or accidental conditions, at a very low computation cost (it takes less than one hour to simulate one year).

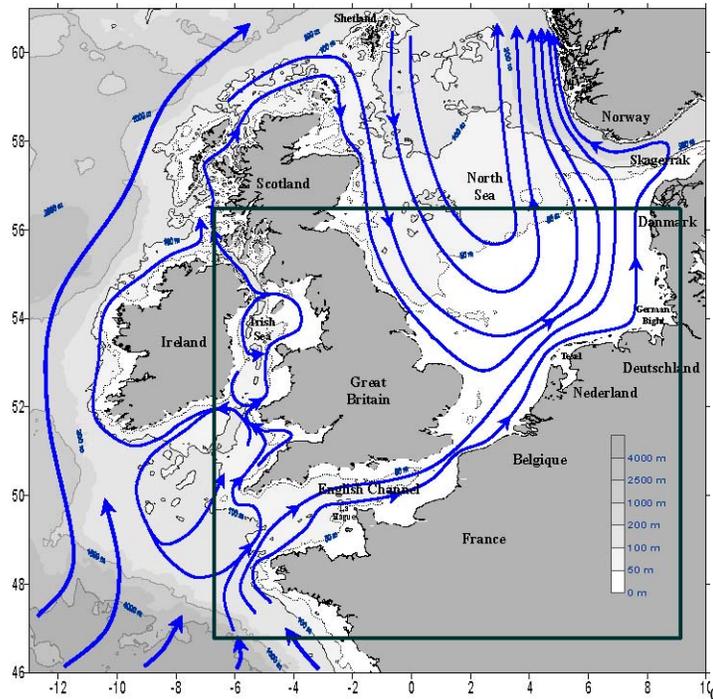
**Mots Clefs :** Manche, Mer du Nord, dispersion, Sb-125, modèle

### **1.Introduction**

L'évaluation de l'impact de rejets de substances polluantes en milieu marin, que ce soit en situation normale ou accidentelle est un enjeu essentiel de l'aménagement littoral. Les modèles hydrodynamiques permettent de simuler la dispersion de substances solubles avec des emprises et des résolutions de calcul très variables. La méthode "lagrangienne barycentrique", mise au point par J.C. Salomon <sup>1,2</sup>, a permis de calculer sur de longues échelles de temps (plusieurs années) et de larges échelles spatiales (plusieurs milliers de kilomètres) le déplacement et la dilution de substances chimiques en solution dans l'eau de mer. Un des intérêts majeurs de tels modèles est d'autoriser des comparaisons directes entre des concentrations de substances solubles obtenues par des simulations, avec des résultats de mesures *in-situ*, les données de terrain résultant généralement du transport des substances dans l'eau de mer sur des distances de plusieurs

dizaines ou centaines de kilomètres, durant des semaines et des mois.

Pour être validés, ces modèles nécessitent des données de terrain ayant une étendue et une précision comparables. Les mesures de radiotraceurs rejetés par les usines de retraitement de combustibles nucléaires constituent des opportunités exceptionnelles pour réaliser de telles validations. La circulation générale des masses d’eau de la Manche et de la Mer du Nord a ainsi pu être précisée par les mesures de radionucléides solubles, le schéma général de ces déplacements est représenté Figure 1<sup>3</sup>.



**Figure 1.** Circulation générale des masses d’eau dans les mers du nord-ouest de l’Europe<sup>3</sup>, et emprise du modèle résiduel (cadre).

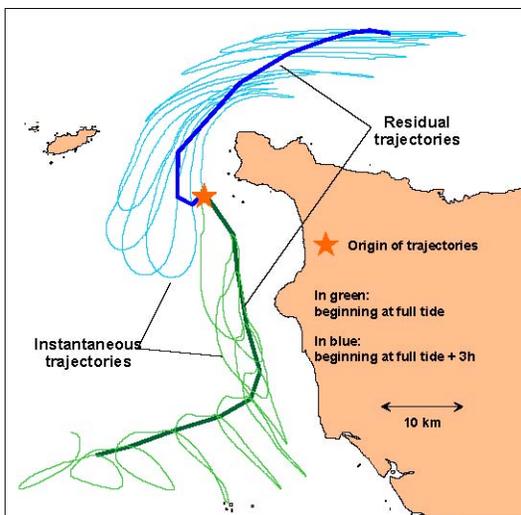
En ce qui concerne la circulation des eaux en Manche et dans le sud de la Mer du Nord, l’antimoine 125 rejeté par l’usine de retraitement de combustibles nucléaires de COGEMA-La Hague est particulièrement intéressant : ces rejets constituent la principale origine de ce radionucléide en échelle Manche et Mer du Nord et ils sont parfaitement connus, rejet par rejet, depuis 1982 ; la période radioactive de <sup>125</sup>Sb est suffisamment longue (2,7 années) ; il est possible de le mesurer à des concentrations très faibles dans l’eau de mer (concentrations 40 000 fois plus faibles que la radioactivité naturelle de l’eau de mer) ; la base de données de mesures de terrain disponible pour la validation est particulièrement importante.

Les résultats obtenus avec le <sup>125</sup>Sb et un modèle de courants résiduels lors de précédents travaux ont montré globalement un bon accord entre les résultats calculés et mesurés. La distribution moyenne des radionucléides mesurée et observée a été bien reproduite à l’échelle de la Manche et de la Mer du Nord<sup>4,5,6,7</sup>. Cependant, il est apparu un écart significatif entre les bilans de radionucléides calculés et mesurés ainsi que dans la répartition spatiale des panaches marqués à une date donnée. La présente étude précise les paramètres de calage du modèle

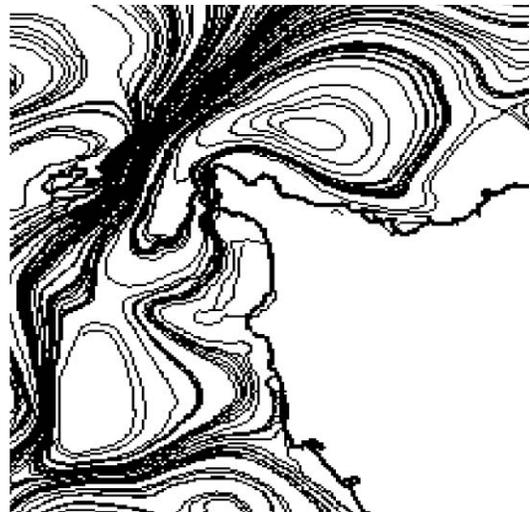
hydrodynamique, en particulier le forçage météorologique, de manière à reproduire le plus fidèlement possible les distributions de traceurs solubles observées à l'échelle de la Manche et de la Mer du Nord. L'objectif est de définir un jeu de paramètres unique permettant de simuler la dispersion de substances en solution dans l'eau de mer dans des conditions réalistes de vent et de marée, à l'échelle de mois ou d'années en Manche et Mer du Nord. Le modèle hydrodynamique ainsi validé constitue la base d'un modèle écologique destiné à reconstituer et prévoir le devenir des substances transportées dans l'eau de mer et échangées avec les espèces vivantes et particulaires.

## 2. Le modèle de courants résiduels

Le modèle utilisé dans ce travail utilise les courants résiduels de marée en coordonnées barycentriques calculés avec un modèle de courants instantanés (Figure 2, Figure 3), en appliquant la méthode développée au cours des années 1985-1993<sup>1,2</sup>. Le détail en est exposé dans<sup>1,5</sup>. Ce type de modèle permet de réduire les temps de calcul d'un facteur 1000 par rapport à un modèle de courants instantanés ayant une emprise et une résolution similaire.



**Figure 2.** Simulation des trajectoires de deux flotteurs lâchés à 3 heures d'intervalle pour un coefficient de marée de 119 (Vives Eaux). Les traits en gras joignent les points des trajectoires distants d'un cycle de marée (12h24mn). La période simulée couvre 5 jours



**Figure 3.** Trajectoires résiduelles lagrangiennes en coordonnées barycentriques à proximité du cap de La Hague

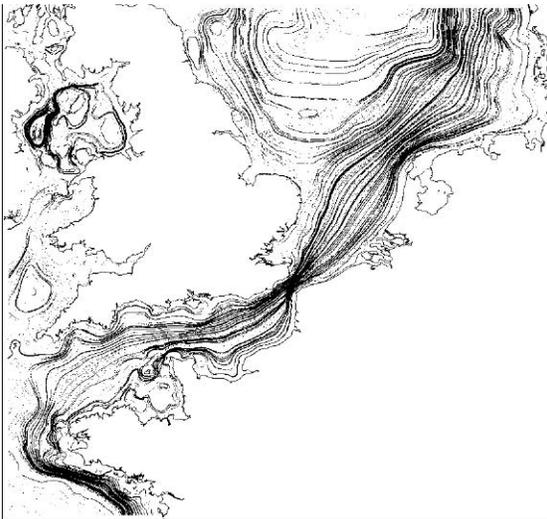
Les fichiers de courants résiduels ont été calculés à l'aide d'un modèle de même résolution et emprise que le modèle résiduel, ce modèle résout complètement les équations de l'hydrodynamique pour un modèle à deux dimensions (équations de Saint Venant). C'est un modèle en coordonnées sphériques basé sur l'hypothèse de la prépondérance de la marée et du vent sur les autres mécanismes de la circulation des masses d'eau. La résolution du maillage est d'environ un km sur toute l'emprise du modèle qui comprend un million de mailles de calcul (Tableau 1). Les conditions aux limites sont fournies par un modèle de plus grande emprise englobant le plateau continental du Nord-ouest de l'Europe.

Ce modèle est lui-même forcé par les observations de l'onde de marée.

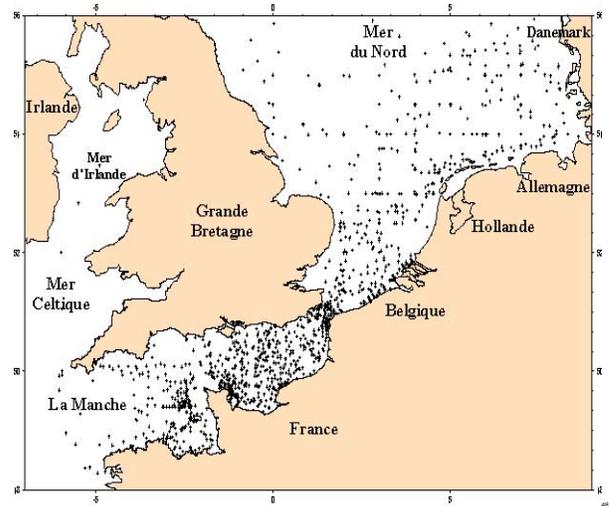
**Tableau 1.** Caractéristiques des modèles hydrodynamiques nécessaires au développement du modèle résiduel

	Modèle global	Modèle de courants instantanés	Modèle de courants résiduels
<b>Emprise</b>	40°N – 65°N 20°W – 10°E	46.82°N – 55.98°N 6.6°W – 9°E	46.82°N – 55.98°N 6.6°W – 9°E
<b>Grille</b>	421 × 501 = 210 921 mailles	1073 × 1022 = 1 096 606 mailles	1073 × 1022 = 1 096 606 mailles
<b>Résolution</b>	≈ 5 km	≈ 1 km	≈ 1 km
<b>Pas de temps</b>	240 s	20 s	Dynamique, 1000 s en moyenne
<b>Temps de calcul par jour de simulation</b>	10 mn 600 s	12 h 43200 s	1s

Les composantes U et V du courant ont été calculées à l'aide du modèle instantané par la méthode lagrangienne barycentrique dans neuf situations de vent et pour une marée moyenne de coefficient 70. La Figure 4 présente la structure des champs de courants résiduels lagrangiens, pour la situation de vent de sud-ouest de 10,8 m.s<sup>-1</sup>. Ces situations sont interpolées en fonction des conditions réelles de marée et de vent au moment de la simulation. Les courants de marée instantanés n'étant pas pris en compte, le modèle n'est utilisable que lorsque les courants résiduels deviennent prépondérants par rapport aux courants instantanés, soit environ une semaine après le début d'un rejet et à plus de 30 km de l'émissaire. Ce mode de calcul permet de réaliser des simulations réalistes de la dispersion de radionucléides durant plusieurs années.



**Figure 4.** Situation de vent de secteur sud-ouest ( $\|\bar{U}\| = 10,8 \text{ m/s}$ ), vue générale



**Figure 5.** Localisation des 1400 mesures de <sup>125</sup>Sb utilisées pour la validation de TRANSMER

### **3. Base de données de mesures d'antimoine 125**

Les données utilisées proviennent de campagnes réalisées par l'IRSN entre 1987 et 1992 à bord de navires de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), du Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF, G.B.), et de mesures réalisées par le Groupe d'Etudes Atomiques (GEA) de la Marine Nationale et par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN-LRC). La plupart des mesures présentées ont été déjà publiées et discutées<sup>8,8,6,7</sup>. La localisation des prélèvements utilisés pour la validation est présentée sur la Figure 5. Leur répartition couvre complètement et de manière répétitive la zone de dispersion du panache des rejets de l'usine de La Hague en Manche et en Mer du Nord.

### **4. Exploitation quantitative des mesures**

Six campagnes de prélèvement comportaient suffisamment de stations de prélèvements (50 à 156 par campagne) pour permettre l'établissement de cartes de distribution des radionucléides artificiels rejetés par les industries nucléaires dans l'eau de mer à l'échelle de la Manche et de la Mer du Nord. Les valeurs ponctuelles ont été interpolées sur tout le domaine concerné lors de la campagne de prélèvement en réalisant un maillage régulier. Une exploitation quantitative des mesures acquises dans l'eau de mer devient alors possible. Les quantités de radionucléides présentes lors des différentes campagnes ont été calculées en multipliant les champs de concentrations résultant de l'interpolation par la bathymétrie en chaque maille de calcul. Le maillage et la bathymétrie du modèle ont été utilisés pour ce calcul. Les quantités de radionucléides obtenues sont alors directement comparables aux résultats obtenus à partir des simulations du modèle hydrodynamique.

### **5. Résultats de la validation**

Le nombre total de simulations réalisées pour valider TRANSMER s'élève à environ un millier<sup>10</sup>. Le principal paramètre ayant fait l'objet d'un ajustement est le mode de calcul de la force de frottement du vent sur la mer qui a dû être significativement augmenté.

La comparaison des distributions de radionucléides mesurées et simulées est présentée sur la Figure 6 et la Figure 7.

Avec les paramètres de validation retenus, la correspondance entre les résultats de simulation et les mesures est la suivante :

Les quantités moyennes globales de radionucléides calculées et mesurées durant les six campagnes de prélèvement réalisées de 1988 à 1994 sont équilibrées à  $\pm 1\%$ , que ce soit sur l'ensemble de la zone de dispersion de la Manche et de la Mer du Nord, ou sur chacune de ces mers prises séparément ;

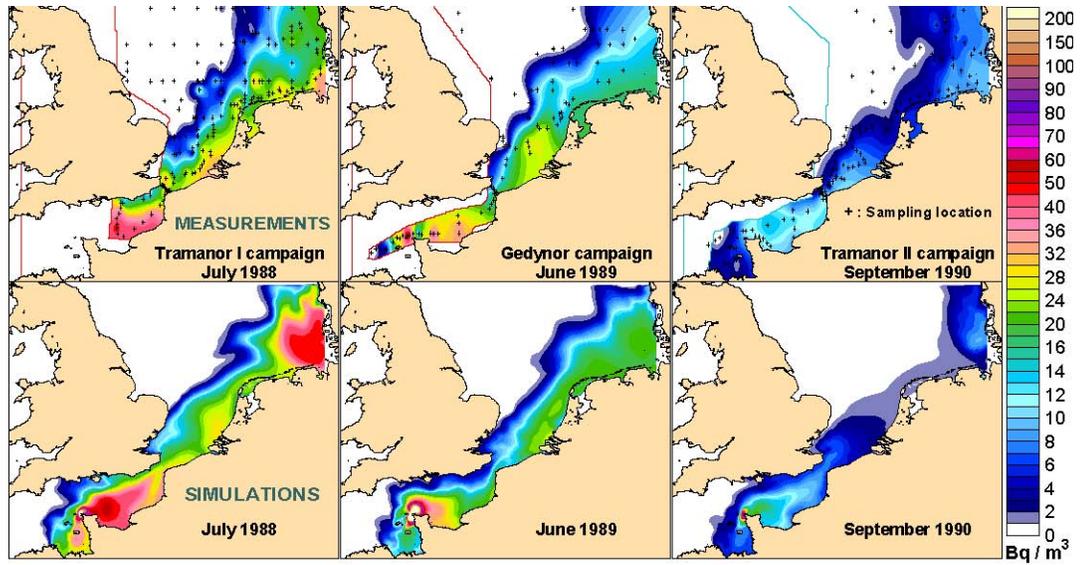


Figure 6. Comparaison des distributions d'antimoine 125 mesurées et simulées en Manche et Mer du Nord entre 1988 et 1990.

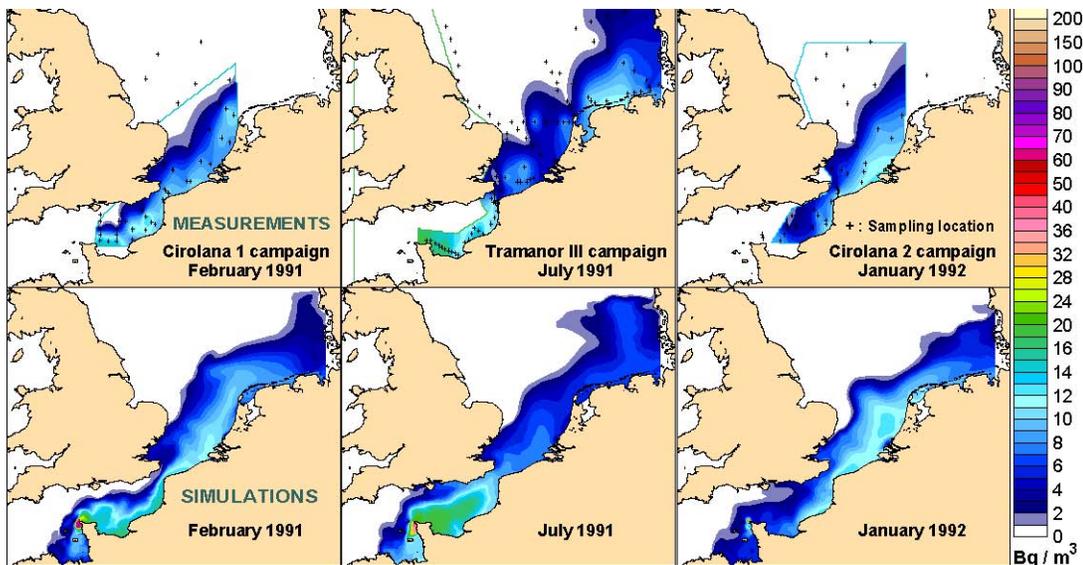


Figure 7. Comparaison des distributions d'antimoine 125 mesurées et simulées en Manche et Mer du Nord entre 1991 et 1992.

- Le coefficient de corrélation entre l'ensemble des 1400 concentrations mesurées et les concentrations calculées aux mêmes lieux et dates est proche de 0,88 ;
- L'écart moyen entre les valeurs individuelles calculées et mesurées est de 54% ;
- Pour la moitié des 1400 mesures, le rapport entre les concentrations mesurées et calculées est inférieur à 1,27, ce rapport est inférieur à 3,6 pour 95% des mesures, il ne dépasse jamais un facteur 12 ;
- Les écarts entre les valeurs calculées et mesurées sont comparables à 30 km ou à 1000 km de l'émissaire ;

– Le coefficient de traînée défini pour le calcul de la force de frottement du vent sur la mer est  $C_d = 0.0015 \times \left\| \vec{W} \right\|_{m.s}^{0.48} \cdot \left\| \vec{W} \right\|$  où  $\left\| \vec{W} \right\|$  est le module du vent avec les données du modèle européen ECMWF ;

– la confrontation avec les résultats de mesure les plus récents, non pris en compte dans le jeu de données de validation, montre un accord au moins équivalent à celui obtenu avec les données utilisées pour la validation du modèle.

A partir des cartes représentant les champs de concentrations au moment de chaque campagne, il est possible de calculer des champs de concentration normalisés en divisant la valeur de concentration dans chaque maille par la quantité de radionucléides rejetée durant les douze mois précédant chaque campagne. En réalisant la moyenne pour toutes les campagnes de ces distributions normalisées, il est possible de visualiser la répartition moyenne du panache de rejet de l'usine de La Hague pour un rejet donné, en l'occurrence, un rejet constant de  $10^{125} \text{ Bq.s}^{-1}$  de  $^{125}\text{Sb}$ . Les résultats des simulations ont été traités de la même manière, les cartes obtenues à partir des mesures ou des simulations sont alors directement comparables, elles sont présentées Figure 8.

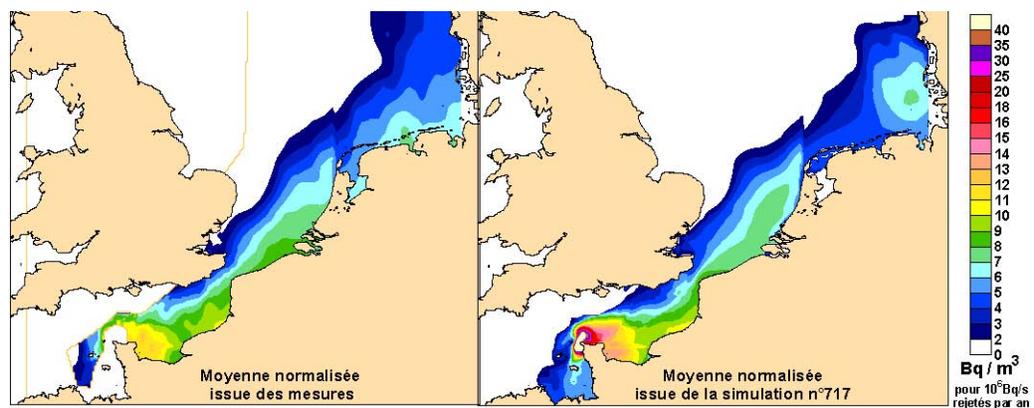


Figure 8. Distribution moyenne mesurée et simulée de l'antimoine 125 entre 1988 et 1992, normalisée pour un rejet de  $10^{125} \text{ Bq/s}$

## 6. Simulation des transferts vers les compartiments biologiques et sédimentaires

Des modules de calcul des transferts vers les compartiments biologiques et sédimentaires ont été incorporés au modèle hydrodynamique. Ces modules simulent de manière dynamique les transferts en s'appuyant sur les données disponibles dans la littérature. Le modèle TRANSMER permet également de préciser ces paramètres lorsque des données de terrain sont disponibles.

## 7. Conclusion

TRANSMER permet de reconstituer ou prévoir la dispersion de rejets chroniques ou accidentels de radionucléides en milieu marin à partir de termes sources, de vents et de marées réels en calculant les concentrations dans l'eau de mer, les espèces vivantes et les sédiments à l'échelle de la Manche et du sud de la Mer du Nord. Les substances prises en compte par TRANSMER peuvent être radioactives ou non, elles doivent avoir un comportement soluble

lorsqu'elles sont transportées par l'eau de mer (densité proche de celle de l'eau de mer). L'écart moyen entre les 1400 valeurs mesurées et calculées est de 56%, ce qui est remarquable pour des simulations de concentrations dans l'environnement sur des durées de plusieurs années et des distances atteignant 1000 km.

## **8. Références**

1. Salomon J.C., Guéguéniat P., Orbi A. and Baron Y., (1988). A lagrangian model for long-term tidally induced transport and mixing. Verification by artificial radionuclide concentrations. Ed. Guary, J.C., Guéguéniat, P., Pentreath, R.J.; In : *Radionucléides : A tool for oceanography*. Cherbourg 1-5 June 1987, Elsevier Applied Science Publishers, 384-394.

2. Orbi, A. and Salomon, J.C., 1988. Dynamique de marée dans le Golfe Normand-Breton . *Océanologica Acta*, **11** (1), 55-64.

3. Bailly du Bois P. Germain P., Rozet M. and Solier L., (2002). Water masses circulation and residence time in the Celtic Sea and English Channel approaches, characterisation based on radionuclides labelling from industrial releases. Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand; *Proc. International Conference on Radioactivity in Environment*, Monaco 1 - 5 September 2002, 395 - 399.

4. Salomon J.C., Breton M. and Guéguéniat P., (1995). A 2D long-term advection-dispersion model for the Channel and southern North Sea. Part B: Transit and transfer function from Cap de La Hague. *Journal of Marine Systems*, **6** (5-6), 515-528.

5. Breton M. and Salomon J.C., (1995). A 2D long-term advection-dispersion model for the Channel and southern North Sea. Part A: validation through comparison with artificial radionuclides. *Journal of Marine Systems*, **6** (5-6), 495-514.

6. Bailly du Bois P., Salomon J.C., Gandon R. and Guéguéniat P., (1995). A quantitative estimate of English Channel water fluxes into the North Sea from 1987 to 1992 based on radiotracer distribution. *Journal of Marine Systems*, Vol. **6** (5-6), 457-481.

7. Bailly du Bois P. and Guéguéniat P., (1999). Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994). *Continental Shelf Research ; FluxManche II Dedicated*, **19**, 1977-2002.

8. Guéguéniat P., Bailly du Bois P., Gandon R., Salomon J.C., Baron Y. and Léon R., (1994). Spatial and Temporal distribution (1987-91) of <sup>125</sup>Sb used to trace pathways and transit times of waters entering the North Sea from the English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **39**, 59-74.

9. Herrmann J., Kershaw P.J., Bailly du Bois P. and Guéguéniat P., (1995). The distribution of artificial radionuclides in the English Channel, southern North Sea, Skagerrak and Kattegat, 1990-1993. *Journal of Marine Systems*, **6** (5-6), 427-456.

10. Bailly du Bois P., (2003). TRANSMER, modèle de simulation des transferts de radionucléides en milieu marin : choix des options, architecture, validation et fonctionnalités. *Rapport IRSN/DPRE/SERNAT/ 2003-04* 188 p.

11. Fiévet B., Plet D., (2002). Estimating biological half-lives of radionuclides in marine compartments from environmental time-series measurements. *Journal of Environmental Radioactivity* **65**, 91-107.