

MODÉLISATION DE LA CIRCULATION OCÉANIQUE EN MANCHE, GOLFE DE GASCOGNE, OUEST-PORTUGAL ET GOLFE DE CADIX

Yves Morel 1, Annick Pichon 1, Stéphanie Louazel 1, Lucia Pineau-Guillou 1, Rémy Baraille 1, Alain Serpette 1, Cyril Lathuilière 1, Fabrice Ardhuin 1, Audrey Pasquet 1, Stéphanie Corréard 2, Michel Assenbaum 2, Sophie Casitas 3, Luis Quaresma Dos Santos 4, Cécile Renaudie 5, Gwenaëlle Hello 5, Hervé Giordani 5, Sébastien Lahaye 6, Xavier Carton 7

Affiliations

- 1 : Service hydrographique et océanographique de la marine
- 2 : Société Géosciences Ingénierie
- 3 : Société ACTIMAR
- 4 : Instituto Hydrografico, Portugal
- 5 : Météo-France
- 6 : Commissariat à l'Énergie Atomique
- 7 : Université de Bretagne Occidentale

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet « MOdélisation d'Un Théâtre d'Opérations Navales » (MOUTON), le SHOM, en partenariat avec de nombreux instituts et des sociétés spécialisées, a mis en place un système numérique de modélisation des courants océaniques sur des zones limitées. Basé sur le modèle numérique international HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model), qui a été largement amélioré dans le cadre du projet MOUTON, ce système vise à reproduire le plus fidèlement possible un certain nombre de phénomènes océaniques dont les principaux sont passés en revue ici. La validation du système a été effectuée sur la base de campagnes à la mer et sur une région couvrant la Manche, le golfe de Gascogne, l'Ouest du Portugal et le golfe de Cadix. Ces résultats montrent de bons accords entre la modélisation numérique et la réalité in situ.

ABSTRACT

The MOUTON project aims at constructing a numerical system to reproduce the oceanic circulation in restricted areas. In this framework, the HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) numerical model was improved and used to reproduce many oceanic processes that are listed here. The validation of the system is based on observations obtained during dedicated campaigns at sea. The area over which the system was tested is the Manche (English Channel), the bay of Biscay, West Portugal and the gulf of Cadiz. The results from the numerical model agree well with the observations.

1. INTRODUCTION – GÉNÉRALITÉS

La division hydrographie, océanographie et météorologie militaires de la direction des opérations du SHOM est responsable du soutien des forces navales dans le domaine de l'environnement océanographique. Dans ce domaine, son activité comprend le développement de systèmes d'analyse et de prévision d'état de la mer. La description de l'océan (analyse) et son évolution probable constituent, en effet, une partie fondamentale des informations « géographiques » nécessaires aux systèmes d'information et de commandement pour la conduite des opérations.

Ce besoin, précisément identifié depuis une quinzaine d'années pour la lutte anti sous-marine dans les grands fonds, a motivé le lancement du développement du système SOAP (système opérationnel d'analyse et de prévision) et la participation du SHOM au groupement d'intérêt public Mercator-Océan, spécialisé dans la modélisation des processus de moyenne échelle du domaine océanique hauturier, et exploitant l'observation altimétrique satellitale par assimilation dans les modèles.

Destinés à la description des grandes masses d'eau pour la lutte acoustique anti sous-marine, SOAP et Mercator-Océan ne répondront toutefois pas aux besoins d'exploitation de la connaissance de l'état de l'océan pour d'autres domaines de lutte, notamment parce que les modèles utilisés ne couvrent pas les approches des continents (talus et plateaux continentaux). Les besoins de la Marine ont évolué, et il s'avère maintenant nécessaire de pouvoir élargir la modélisation opérationnelle à de nouvelles régions, notamment côtières.

Dans ce cadre, le programme d'études amont (PEA) n° 012401 intitulé « MOdélisation d'Un Théâtre d'Opérations Navales » (MOUTON) vise à préparer l'extension des modèles opérationnels d'analyse et de prévision d'état de la mer vers les zones côtières, pour servir l'ensemble des opérations navales. Ce programme est financé par la Délégation Générale pour l'Armement (DGA).

Sur le plan technique, un système d'analyse et de prévision de l'état de l'océan repose en particulier sur un modèle numérique d'évolution de l'océan. Le choix s'est porté sur le modèle HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) pour les raisons suivantes :

- HYCOM est un modèle en « coordonnée verticale hybride », ce qui signifie que la grille de calcul peut être adaptée à chaque instant à la configuration de la zone et aux phénomènes physiques qu'on veut représenter. En particulier, cette grille évolutive peut s'adapter aux régions de fortes variations de densité. Cette propriété est particulièrement utile pour la modélisation d'un certain nombre de processus océaniques de fort intérêt, comme par exemple :
 - la dynamique des fronts thermohalins (panaches de fleuves, fronts de marée, upwellings et autres courants de bord) ;
 - la représentation des tourbillons océaniques ;
 - le passage des talus et la transition hauturier/côtier ;
 - la représentation des thermoclines très marquées (ce qui est le cas sur le plateau armoricain), voire la dynamique de la couche de mélange en général.

- la communauté des utilisateurs du code HYCOM est internationale et très vaste. Elle est constituée de plusieurs centaines de chercheurs, principalement situés aux États-Unis et en Norvège ; quelques laboratoires utilisent aussi ce code au Royaume-Uni, au Portugal, en Grèce et en France. Ceci permet de démultiplier les développements et validations du modèle (en particulier sur un vaste ensemble de régions océaniques, ce qui est hors de portée d'un laboratoire seul) et de mettre en place des coopérations, notamment avec les États-Unis et le Portugal.

Ce modèle, développé au départ pour des simulations à échelle de bassin, a toutefois dû être adapté à la simulation régionale, notamment côtière. Le présent article recense les améliorations effectuées au SHOM sur ce code et les résultats obtenus au cours du projet MOUTON.

2. AMÉLIORATIONS ET DÉVELOPPEMENTS EFFECTUÉS SUR LE CODE HYCOM

Si les équations hydrodynamiques, connues depuis le 19^e siècle, sont les mêmes pour la modélisation de l'océan hauturier et côtier, l'élargissement de la modélisation numérique réaliste à de nouvelles régions, notamment côtières, pose un certain nombre de difficultés : certaines hypothèses simplificatrices étant valides en hauturier mais pas en côtier. En particulier :

- les transitions grands fonds / petits fonds et les échanges côtes / large sont des zones particulièrement difficiles à modéliser, car les modèles actuels ne sont en général pas adaptés pour traiter correctement les zones de forts gradients bathymétriques ;
- la marée (et a fortiori la marée interne) n'est pas prise en compte dans les modèles hauturiers alors qu'elle s'avère primordiale pour la dynamique des zones côtières ;
- les schémas numériques des modèles hauturiers sont parfois inadaptés voire instables (ce qui signifie qu'une simulation va générer des résultats complètement fantaisistes avec des températures de plusieurs millions de degrés !) en zone de faibles fonds.

Pour faire face à ces problèmes, plusieurs développements ont été réalisés sur le modèle HYCOM. Les plus importants sont résumés ci-dessous.

En premier lieu, la modélisation de la marée en zone côtière a demandé de revoir les schémas numériques temporels du code HYCOM, qui avait été mis au point pour des fonds supérieurs à environ 20 m. Ce schéma originel s'est avéré instable (voir Figure 1) et a donc été corrigé (réf. a). Par ailleurs, les côtes de la Manche étant sujettes à de très fortes amplitudes de marée, certaines régions sont régulièrement couvertes et découvertes par la mer, ce qui s'avère difficile à gérer numériquement : des points de grilles peuvent se retrouver « sans eau », les champs physiques y étant calculés deviennent fantaisistes et peuvent polluer le reste de domaine. Un schéma numérique spécial a ainsi été développé pour prendre en compte ce processus. Pour finir, les modèles régionaux étant par nature d'emprise limitée, ils doivent être forcés à leurs limites par des modèles globaux ou de bassin. L'implémentation de ces conditions aux limites est assez délicate à mettre en place et, là encore, une solution numérique originale a été mise en place au SHOM : Elle

consiste à contraindre les flux d'eau aux frontières (plutôt que les vitesses ou les hauteurs d'eau) afin de garder un contrôle général sur les masses d'eau entrant et sortant du modèle régional, notamment à cause de la marée.

D'autres améliorations ont été réalisées :

- un schéma numérique d'ordre élevé a été mis en place pour l'évolution des vitesses (réf. b) ;
- une méthode d'adaptation de la résolution verticale, à la thermocline saisonnière et au développement de la couche de mélange, a été développée dans le cadre d'une coopération avec Météo-France.

Dans le cadre du projet MOUTON, plusieurs modèles réalistes ont été mis en place sur une partie de l'Atlantique Nord-Est comprenant : la Manche et le golfe de Gascogne, le large du Portugal et l'ouvert du golfe de Cadix. Ces maquettes régionales ont été réalisées à très haute résolution (1,7 à 3 km en horizontal). Elles sont initialisées et forcées aux limites par les systèmes globaux Mercator-Océan (dynamique à grande et moyenne échelle) et MOG2D (modèle de marée du CNRS/LEGOS utilisé pour le forçage de la marée). Les forçages atmosphériques (vent, flux de chaleur et précipitations) sont ceux du système ARPEGE de Météo-France. La bathymétrie est, bien entendu, fournie par le SHOM (source BATMANE, division SHOM/DO/MIP) avec quelques corrections pour la partie sud (contribution de l'Instituto Hydrografico du Portugal dans le cadre d'une coopération avec cet organisme).

Le paragraphe suivant présente quelques résultats issus de ces modèles réalistes.

3. LA VALIDATION DU MODÈLE

La validation d'un modèle numérique repose essentiellement sur la confrontation de ces résultats à des données in situ et satellitales. Les observations en domaine côtier étant assez rares, le projet MOUTON a aussi visé à la mise en place de campagnes de mesures en mer, pour acquérir des données ciblées sur un certain nombre de phénomènes océaniques et effectuer cette validation. Cinq campagnes de grande envergure (plus de 200 jours de mer en tout) ont ainsi été réalisées, au cours de ce projet, sur la période 2005 à 2009. Les données de ces campagnes ont, pour la plupart, été analysées et confrontées aux résultats du modèle numérique (réf. c), en sélectionnant les processus clés sur la zone Manche-golfe de Gascogne et Ouest Portugal-golfe de Cadix. Nous résumons ci-dessous ces résultats.

3.1. Dynamique tourbillonnaire

Les observations à la mer effectuées, notamment dans le cadre du projet MOUTON, indiquent qu'un facteur essentiel des échanges côte-large est la dynamique tourbillonnaire à moyenne échelle. Il est ainsi primordial de représenter correctement cette dynamique dans le modèle, notamment aux abords du talus continental. La figure 2 montre le développement de la turbulence à moyenne échelle dans la maquette Manche-Gascogne. Des tourbillons sont effectivement formés en quelques semaines, par instabilité des courants de pente dans la zone, et emplissent rapidement le bassin.

Leurs caractéristiques ont été comparées à des observations et sont en très bon accord pour ce qui est de leur extension. Leur durée de vie est toutefois trop courte dans le modèle -environ 6 mois pour 1 an voire parfois plus dans les observations- car ils semblent interagir fortement entre eux, les nouveaux tourbillons plus récents étirant les plus anciens jusqu'à leur filamentation et disparition.

3.2. Marée

La marée est bien entendu un phénomène majeur à bien représenter dans le modèle numérique, notamment en zone côtière. Plusieurs analyses ont ainsi été réalisées. Elles ont montré la capacité du modèle à représenter correctement la marée :

- la figure 3 montre une comparaison entre l'amplitude de la marée M4 (non-linéaire) en Manche dans les observations de Le Provost et dans le modèle HYCOM Manche-Gascogne ;
- la figure 4 représente une comparaison au large de Lisbonne (Cascas) pour les ondes M2, S2, N2, K2 ;
- la figure 5 représente les zones découvrantes dans le golfe Normand-Breton.

Le modèle donne ainsi une représentation correcte de la réalité pour ce phénomène.

La marée étant extrêmement forte aux abords des côtes bretonnes, elle donne naissance à des fronts thermohalins très intenses : c'est le phénomène de front de marée. En effet, en été, l'ensoleillement provoque un réchauffement des couches de surface sur une trentaine à une quarantaine de mètres. La colonne d'eau, homogène et froide au sortir de l'hiver, peut alors être représentée, de manière simplifiée, en deux couches : une couche de surface chaude et une couche de fond froide, séparées par une zone de forte variation de température : la « thermocline ». Les températures de surface atteignent 22 à 25°C au Sud du golfe de Gascogne et 17 à 20°C au Nord, pour des températures de 10 à 12°C dans les couches profondes.

En mer d'Iroise, autour des îles d'Ouessant et de Sein, les courants de marée atteignent 4 à 5, voire 6 nœuds localement. Ces forts courants engendrent un brassage vertical des eaux : les eaux chaudes estivales de surface se mélangent aux eaux froides des couches profondes donnant naissance à une eau dont la température varie entre 13 et 15°C sur l'ensemble de la colonne. En surface il existe alors de fortes variations de température liées à ce phénomène, avec un fort refroidissement dans les zones mélangées. La figure 6 représente une comparaison de températures de surface entre des observations et le modèle en juillet 2004. Noter le fort refroidissement autour des îles d'Ouessant et de Sein : la température de surface est d'environ 17,5°C au large et de 14°C seulement entre les îles et la côte. Les observations et le modèle sont, là encore, très proches.

3.3. Marée interne

La marée et la stratification engendrent aussi un autre phénomène de prime importance pour la dynamique de la zone Manche-Gascogne : la « marée interne ». Comme expliqué plus haut, en été l'océan est constitué d'une couche de surface chaude et une couche de fond froide, séparées par la « thermocline ». Quand le courant de marée rencontre une

remontée du fond, il génère des courants verticaux qui vont déplacer vers le haut (flux) puis vers le bas (reflux) la thermocline (voir figure 7). C'est le phénomène de marée interne. Ceci s'accompagne de fortes modifications du champ de vitesse de la marée initiale. En effet, comme le montre la Figure 8, les courants ne sont plus constants sur la verticale : la compression (l'étirement) de la couche de surface engendre des accélérations (décélérations) importantes, modifiant fortement le courant en surface. La figure 8 présente l'évolution du profil de vitesse avec la marée et la marée interne, en un point fixe au large de la mer d'Iroise. Noter les similarités entre observations et modèle avec un quasi-doublement du courant de marée « barotrope » dans la couche de surface par la marée interne. Ce phénomène est ainsi de prime importance pour représenter correctement la dérive en surface. Il est aussi suffisamment intense le long du talus continental pour être associé à un refroidissement de la température de surface : là encore les courants de marée interne engendrent du mélange et brassent les eaux de surface avec celles situées en profondeur (voir figure 15).

3.4. Panaches de fleuves

Les fleuves amènent sur le littoral des eaux dont les caractéristiques sont très marquées : elles ne sont bien sûr pas salées et souvent de températures assez différentes par rapport aux eaux côtières. Ceci forme également des fronts thermohalins donnant naissance à des courants locaux. Ce phénomène est aussi associé au développement d'une intense activité biologique. La figure 9 compare la température de surface du modèle aux observations sur le plateau du golfe de Gascogne, marqué par les apports de la Gironde, de la Loire, de l'Adour et d'autres rivières de moindre importance. En hiver, les eaux continentales sont plus douces que les eaux océaniques et les panaches des fleuves sont ainsi assez bien marqués. Noter en effet le refroidissement à la côte, associé aux crues hivernales. L'extension du panache semble correcte dans l'ensemble quoique la propagation soit trop limitée au Nord et sa température un peu trop chaude dans le modèle.

La figure 10 représente une comparaison entre des observations et le modèle pour la température à 10 m de profondeur à l'embouchure de la Gironde.

3.5. Évolution de la couche de mélange

La dynamique de la couche de surface est dominée par les interactions avec l'atmosphère, qui apporte chaleur et mouvement, voire brassage (action du vent). Cette couche de mélange va en grande partie déterminer la position de la thermocline et les caractéristiques thermiques et dynamiques des eaux de surface. Elle est assez délicate à modéliser. Une étude (réf. d) a été réalisée pour évaluer la capacité du modèle à représenter correctement ce processus de couche de mélange en zone côtière.

La figure 11 représente l'évolution du profil de température observé lors d'une campagne en mer en un point fixe situé à proximité de l'île Vierge. Ces mesures sont comparées aux résultats du modèle de couche de mélange utilisé dans HYCOM. En journée, les flux de chaleur atmosphériques réchauffent les couches de surface de 0,1 à 0,2°C. La colonne d'eau est toutefois homogénéisée fréquemment par le brassage lié au vent en surface et aux courants de marée

(atteignant environ 3 nœuds dans la zone) sur la partie plus profonde de la colonne d'eau. Ces phénomènes sont correctement représentés dans le modèle.

3.6. Courant de gravité

Dans l'océan, les grands bassins génèrent des masses d'eau dont les caractéristiques sont très marquées et différentes les unes des autres. Lorsque deux bassins sont séparés par un détroit, les échanges de masses d'eau donnent naissance à des courants parfois très intenses et dont l'évolution est souvent particulière. C'est le cas au niveau du détroit de Gibraltar où les bassins atlantique et méditerranéen interagissent. Le bassin méditerranéen est un bassin de concentration, ce qui signifie que, sous l'action de l'évaporation, ce bassin génère des eaux plus chaudes mais surtout très salées par rapport aux eaux atlantiques. Ces eaux méditerranéennes sont alors plus denses et coulent en profondeur vers l'Atlantique au niveau du détroit de Gibraltar, formant un « courant de gravité ». Les eaux atlantiques, plus « légères » entrent en surface en Méditerranée. Les eaux méditerranéennes coulent et se mélangent pour atteindre une profondeur d'équilibre de quelques centaines à environ 1000 m. Sous l'action de la force de Coriolis (la rotation de la terre dévie les mouvements vers la droite dans l'hémisphère Nord) elles vont être plaquées le long du talus continental ibérique et former un courant chaud et très salé. Ce courant est ensuite instable et va former des tourbillons qui vont se propager dans le bassin atlantique sur plusieurs milliers de kilomètres en gardant dans leurs cœurs des eaux méditerranéennes : les Meddies.

Les courants de gravité, comme la veine méditerranéenne décrite ci-dessus, sont des phénomènes complexes difficiles à représenter avec des modèles numériques. La maquette HYCOM sud a été testée pour ce phénomène. La figure 12 représente une coupe de salinité à travers le golfe de Cadix, le long de 8°20'W. Les campagnes SEMANE ont permis de recueillir des données et de caractériser précisément cette veine d'eau. Les observations ont montré qu'il se formait en fait au moins trois veines à différentes immersions : 600 m, 900 m et 1350 m. Ces veines sont associées à des maxima de salinité très marqués : jusqu'à 36,8 psu soit environ 1 psu de plus par rapport aux eaux environnantes. Le modèle Ouest-Portugal-golfe de Cadix reproduit correctement les immersions et caractéristiques physiques de ces veines. Celles-ci sont toutefois très sensibles à des détails de la topographie dans le détroit de Gibraltar et au frottement sur le fond.

3.7. Upwellings côtiers

Un dernier phénomène de fort intérêt, car associé à des fronts thermiques et des courants côtiers très intenses, est le développement d'upwellings à la côte sous l'action du vent. Reprenons notre représentation simplifiée de l'océan sous la forme d'une couche de surface chaude et une couche de fond froide, séparées par la « thermocline ». Lorsqu'un vent souffle parallèlement à la côte, il va avoir tendance à pousser les eaux de surface dans son sens. Toutefois, la force de Coriolis va dévier le mouvement vers la droite et, si le vent laisse la côte à gauche, va chasser les eaux chaudes de surface de la côte vers le large. Celles-ci vont alors être remplacées par des eaux profondes, bien plus froides : c'est le phénomène d'upwelling.

En été, l'anticyclone des Açores remonte vers le Nord et s'intensifie, engendrant des flux de Nord le long des côtes portugaises et Ouest espagnoles, propices au développement d'upwellings. La figure 13 présente la température de surface en septembre 2005 le long de ces côtes (observations et résultats du modèle). Noter le fort refroidissement à la côte (la température passe de 22°C au large à 13°C à la côte), marquant le phénomène d'upwelling. Noter aussi les méandres qui se détachent de la côte : le courant d'upwelling est en effet instable et des filaments qui s'en détachent sont très localisés. Le modèle reproduit ces phénomènes assez précisément. La figure 14 est une coupe verticale de température perpendiculaire à la côte, montrant la structure de l'upwelling dans les couches profondes. Le modèle semble toutefois trop chaud sur l'ensemble de la colonne d'eau et notamment dans la couche de surface.

4. CONCLUSION

La figure 15 représente une vue d'ensemble de la température de surface sur la zone Manche-Gascogne et compare de façon générale observations et résultats du modèle pour les processus discutés plus haut liés à des fronts thermiques (front de marée, de marée interne, panache de fleuve, upwelling, ...). Elle résume la bonne concordance entre le modèle développé et les observations réalisées dans le cadre du projet MOUTON.

Cette maquette numérique a fonctionné en temps réel au SHOM et a été utilisée récemment dans le cadre d'un exercice POLMAR de suivi de polluants. La figure 16 montre une comparaison entre les résultats de cette maquette Manche-Gascogne et ceux du système opérationnel MOTHY de Météo-France, montrant une bonne concordance et l'intérêt d'un tel modèle pour la dérive en surface et le soutien aux politiques publiques maritimes.

Enfin, des tests de portabilité de ces maquettes sont réalisés régulièrement dans le cadre d'exercice (ou d'opérations) de la Marine. Un test pré-opérationnel a ainsi été réalisé en mer d'Arabie lors de l'exercice GAN07. La figure 17 présente une comparaison entre les profils bathythermiques in situ, réalisés lors du déploiement, et ceux résultant d'une simulation numérique du modèle sur la zone. Là encore les accords sont bons, montrant que la démarche d'analyse et validation, sur la base de phénomènes physiques particuliers, permet une exportabilité du modèle.

Les pistes futures de développement sur ce modèle de circulation sont multiples. Pour commencer, des études sont en cours pour y intégrer l'assimilation de données et rendre le modèle encore plus réaliste et opérationnel (en positionnant en temps réel les structures, notamment tourbillonnaires et frontales, à « la bonne place au bon moment »). Enfin, les pistes d'amélioration majeures des modèles s'orientent vers le couplage de modèles de circulation avec des modèles de vagues ou biogéochimiques, permettant de prendre en compte les interactions dynamiques entre phénomènes de différentes échelles (par exemple entre courant de moyenne échelle et vague, voir l'article de Fabrice Ardhuin dans ce même numéro). Un nouveau programme vient d'être lancé en ce sens au SHOM : PROTEVS (PRévision Océanique, Turbidité, Écoulement, Vagues et Sédimentologie).

Références

a/ YVES MOREL, RÉMY BARAILLE ET ANNICK PICHON, 2008. « Time splitting and linear stability of the slow part of the barotropic component ». *Ocean Modelling* (23, PP. 73-81. doi:10.1016/j.ocemod.2008.04.001).

b/ NINA WINTHER, YVES MOREL ET GEIR EVENSEN, 2007. « Efficiency of high order numerical schemes for momentum advection ». *Journal of Marine Systems* (67, pp. 31-46).

c/ SOCIÉTÉS GÉOSCIENCES INGÉNIERIE ET ACTIMAR « Projet HYCOMANE, Maquette Gascogne-Manche, simulations sur l'année 2005 ». *Rapport d'activité scientifique*.

d/ RENAUDIE, YVES MOREL, GWENAËLLE HELLO ET HERVÉ GIORDANI, RÉMY BARAILLE, 2009. « Study and validation of an oceanic mixed layer model in a tidal and wind-mixed coastal region ». En révision pour publication dans *Ocean Modelling*.

FIGURES

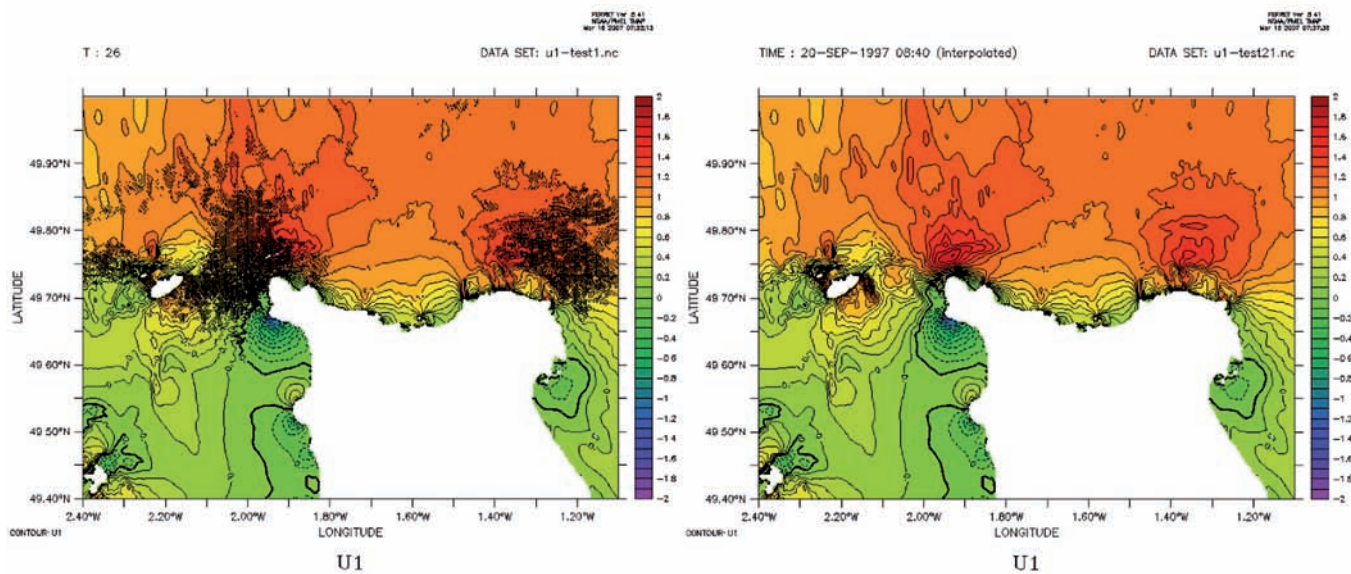


Figure 1 : Courant de surface au large du Cotentin avec le schéma numérique temporel originel du code (à gauche) et le nouveau schéma numérique (à droite). Noter la disparition du « bruit numérique » pour le nouveau schéma.

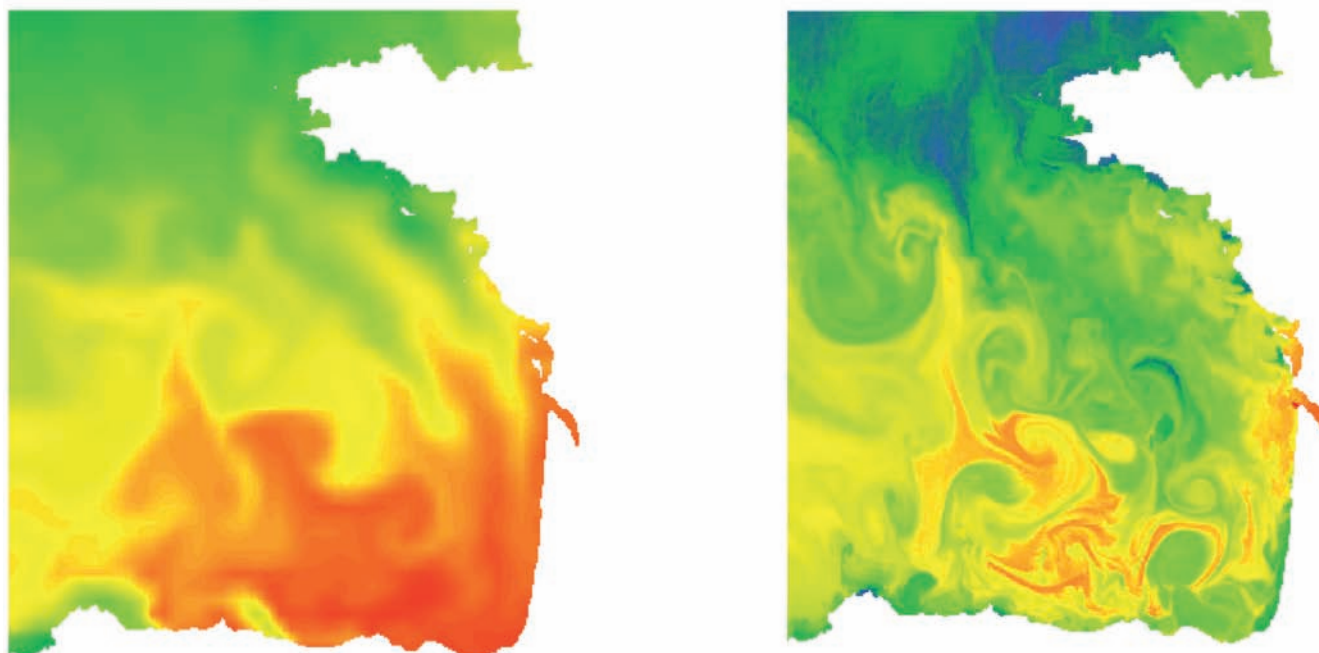


Figure 2 : Évolution de la température de surface depuis l'état initial donné par Mercator-Océan (à gauche) et après 2 semaines de simulation dans la maquette à haute résolution HYCOM (à droite). Noter le développement des tourbillons, dont les échelles (diamètre de 30 à 100 km) sont très réalistes.

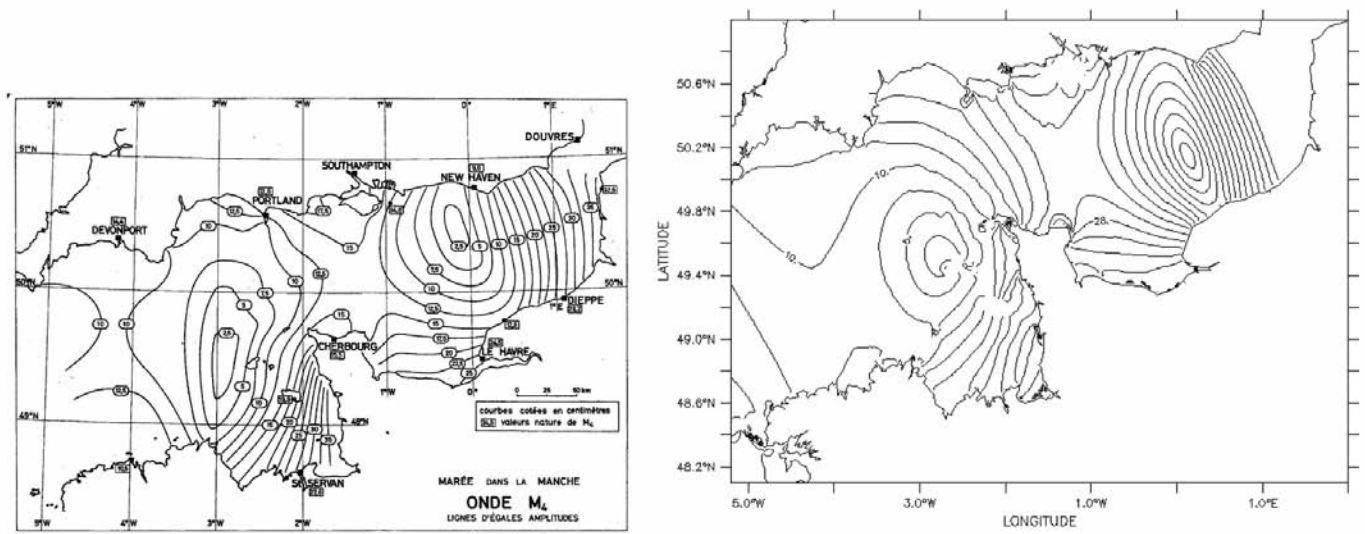


Figure 3 : Amplitude de la marée M4 en Manche dans les observations de Le Provost (à gauche) et dans le modèle HYCOM Manche-Gascogne (à droite). Noter la bonne concordance générale du modèle avec les observations.

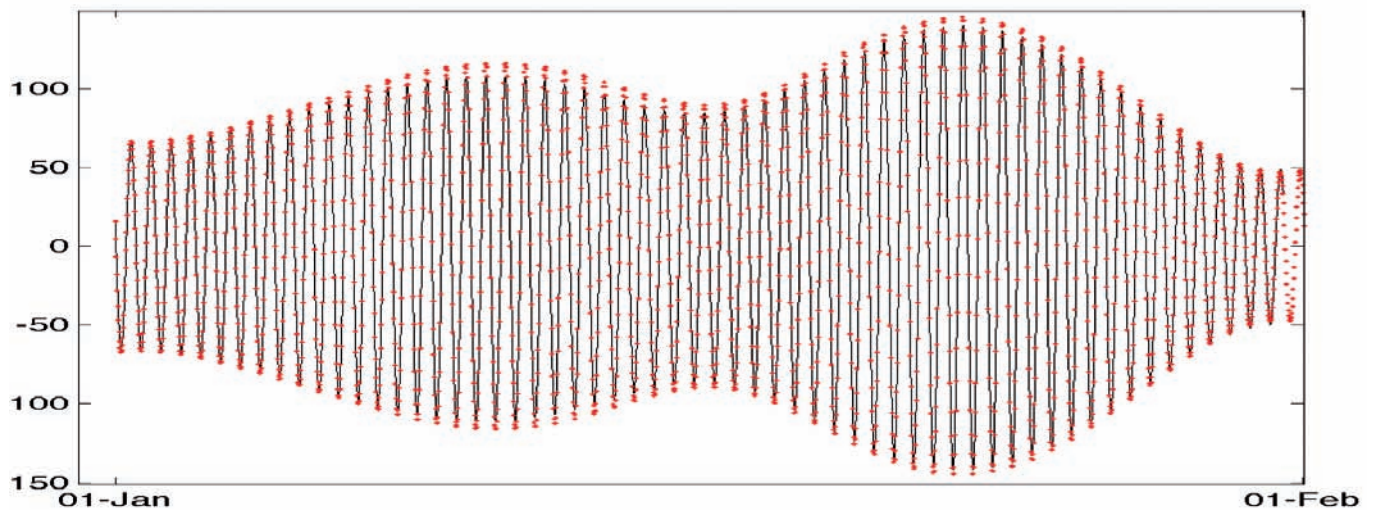


Figure 4 : Amplitude de la marée (en cm, ondes M2, S2, N2, K2), sur le mois de janvier 2004, donnée par le modèle HYCOM Ouest-Portugal-Cadix (trait noir) et le marégraphe de l'Instituto Hydrografico de Cascais (sur le plateau du Tage, points rouges).

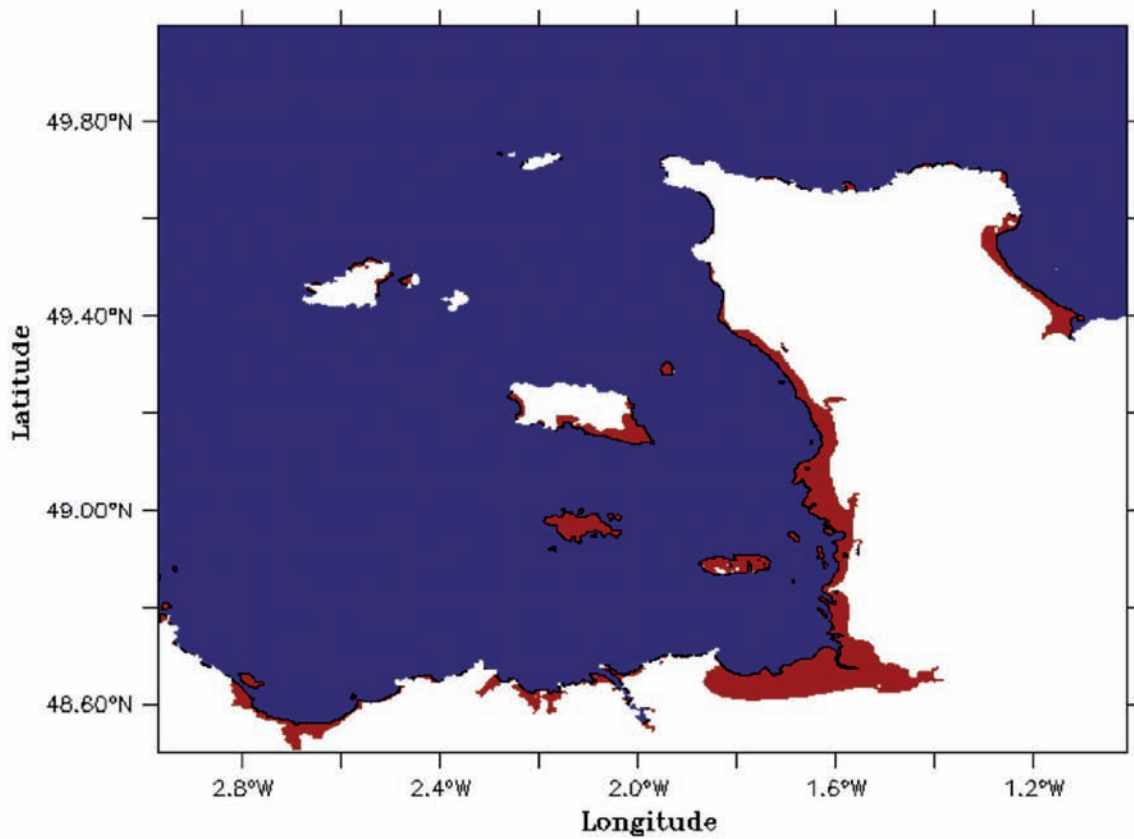


Figure 5 : Zoom sur le golfe Normand-Breton donnant les zones découvertes sur le modèle HYCOM (en marron).

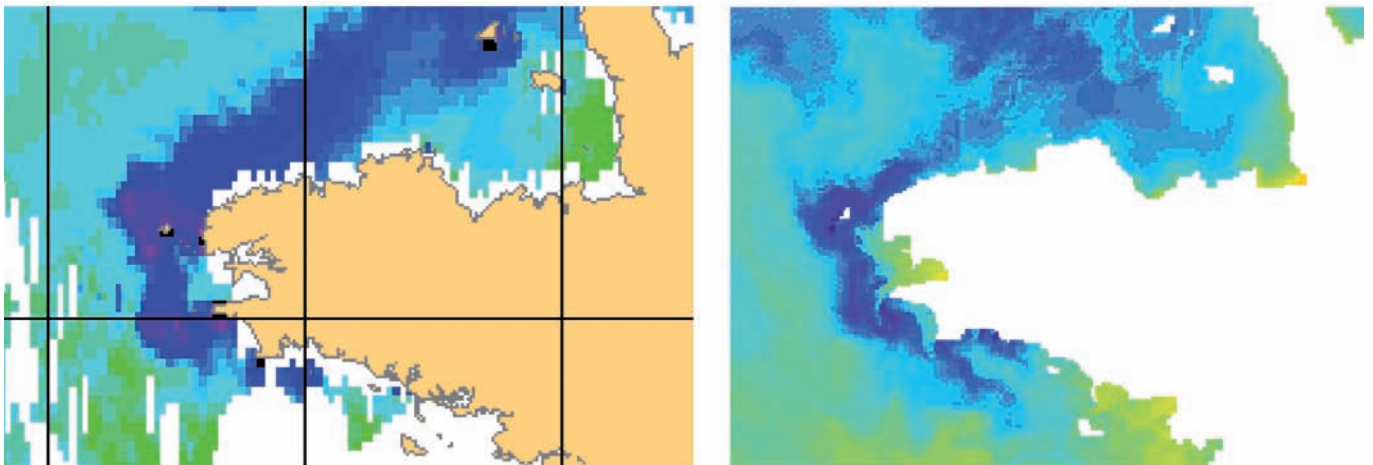


Figure 6 : Température de surface de la mer au 06 juillet 2004 observée par satellite (à gauche) et donnée par le modèle HYCOM (à droite). Noter le fort refroidissement autour des îles d'Ouessant et de Sein (la température de surface est d'environ 17,5°C au large et de 14°C seulement entre les îles et la côte)

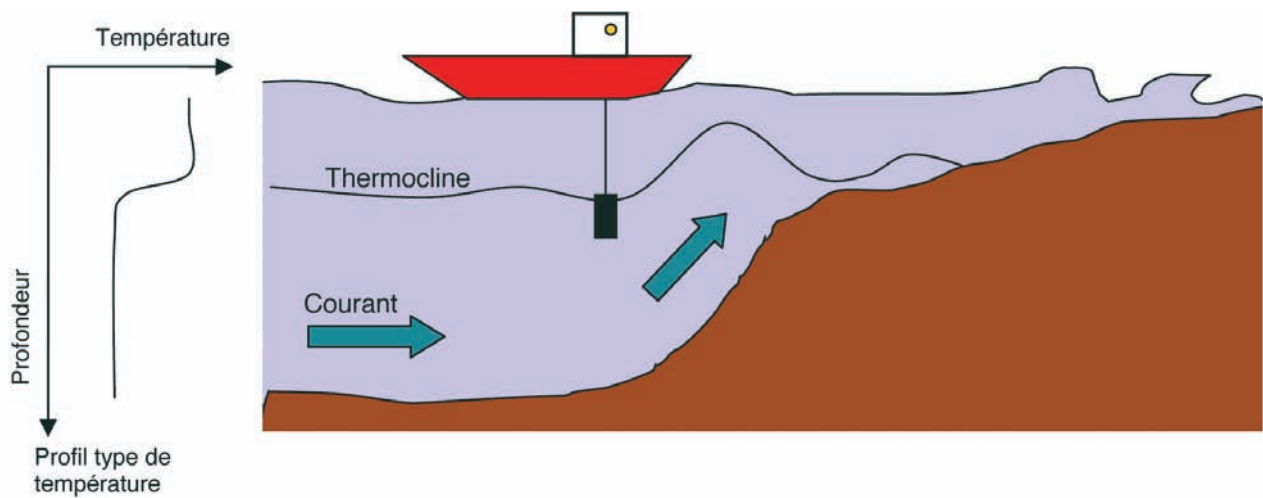


Figure 7 : Principe du développement de la marée interne. L'ensoleillement estival réchauffe les couches de surface océanique et la colonne d'eau peut être représentée, de manière simplifiée, en deux couches : une couche de surface chaude et une couche de fond froide, séparées par une zone de forte variation de température, la « thermocline ». Quand le courant de marée rencontre une remontée du fond, il génère des courants verticaux qui vont déplacer vers le haut (flux) puis vers le bas (reflux) la thermocline. C'est le phénomène de marée interne. Ceci s'accompagne de fortes modifications du champ de vitesse de la marée initiale.

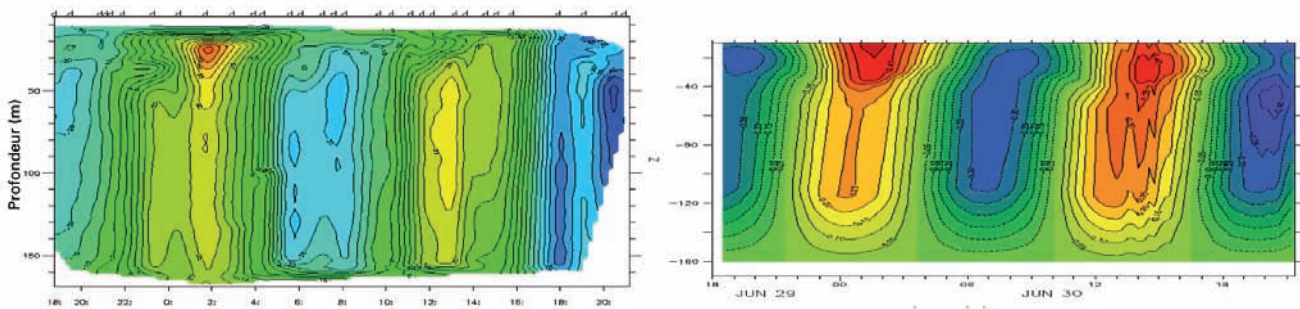


Figure 8 : Évolution du profil de vitesse avec la marée et la marée interne, au large de la mer d'Iroise dans les observations (à gauche) et le modèle (à droite). Noter les similarités entre observations et modèle. Noter en particulier l'intensification des courants dans la couche de surface : la marée interne engendre un quasi-doublement du courant de marée « barotrope ».

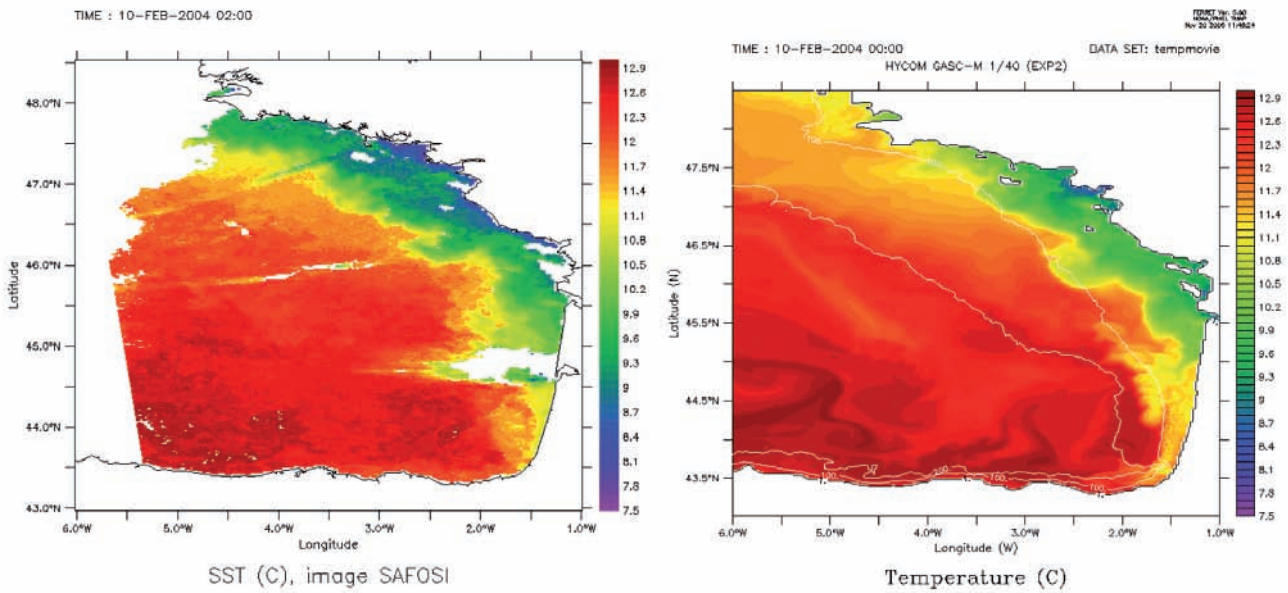


Figure 9 : Température de surface de la mer autour du 12 février 2004 observée par satellite (à gauche) et donnée par le modèle (à droite). Noter le refroidissement à la côte, associé aux crues hivernales. L'extension du panache semble correcte dans l'ensemble, quoique la propagation soit trop limitée au nord et sa température un peu trop chaude dans le modèle.

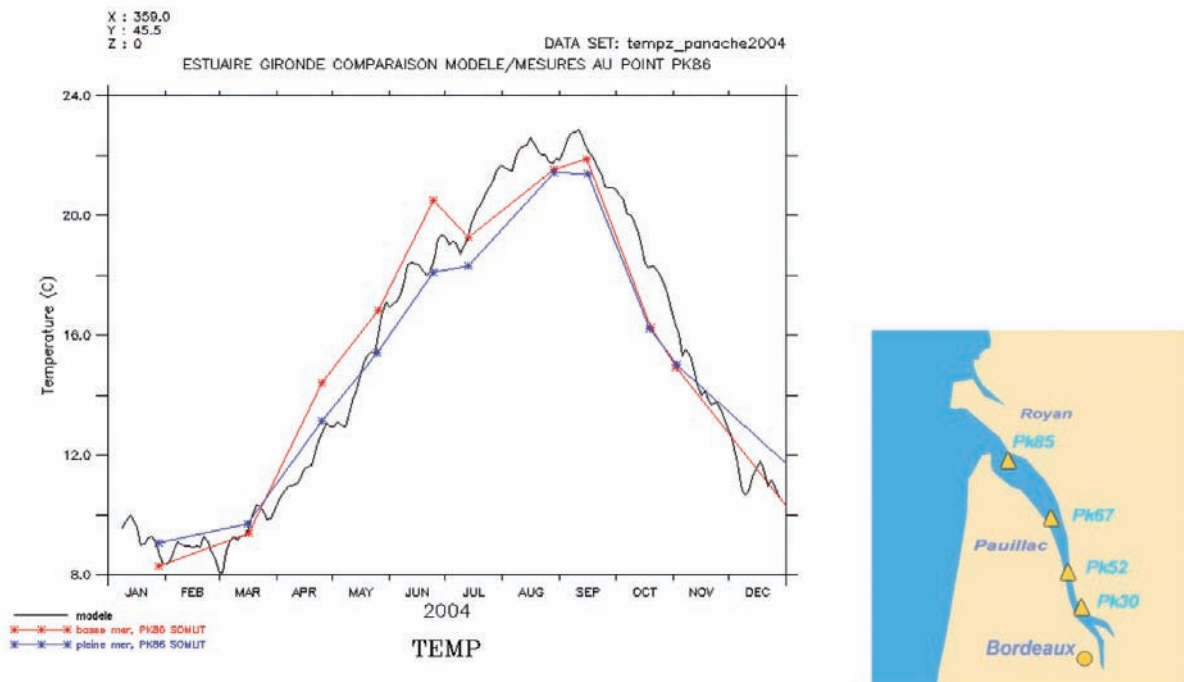


Figure 10 : Évolution de la température à 10 m à l'embouchure de la Gironde (point Pk85, donnée SOMLIT) observée par marée haute (trait bleu) et marée basse (trait rouge) et donnée par le modèle (trait noir).

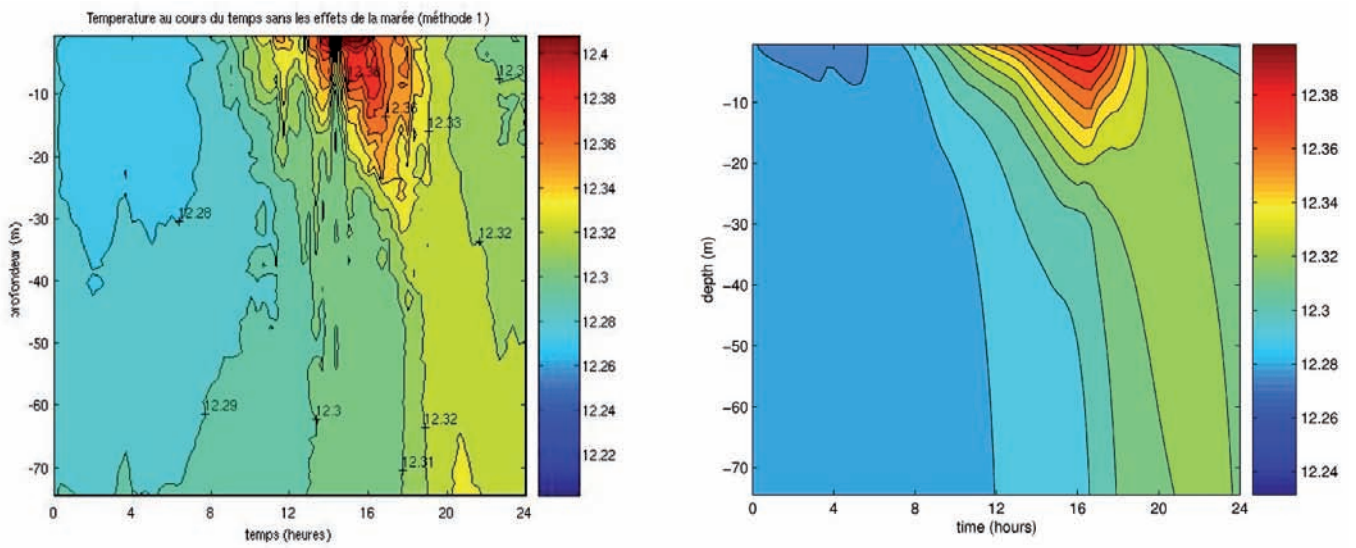


Figure 11 : Évolution du profil de température au Nord de l'île vierge, observée lors de la campagne MOUTON2007-1 (à gauche) et donnée par un modèle simplifié de couche de mélange (à droite).

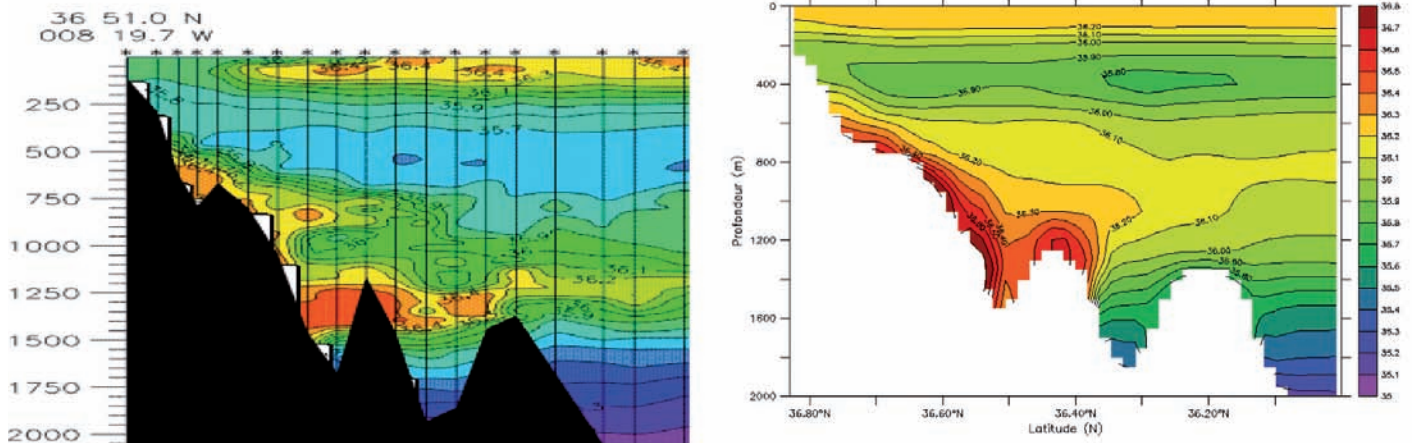


Figure 12 : Coupe de salinité dans le golfe de Cadix (8°20' W), observée lors de la campagne SEMANE1997 (à gauche) et modélisée par HYCOM. Noter les trois maxima de salinité sur le talus : à 600 m, 900 m et 1350 m, correspondant à l'écoulement des eaux d'origine méditerranéenne.

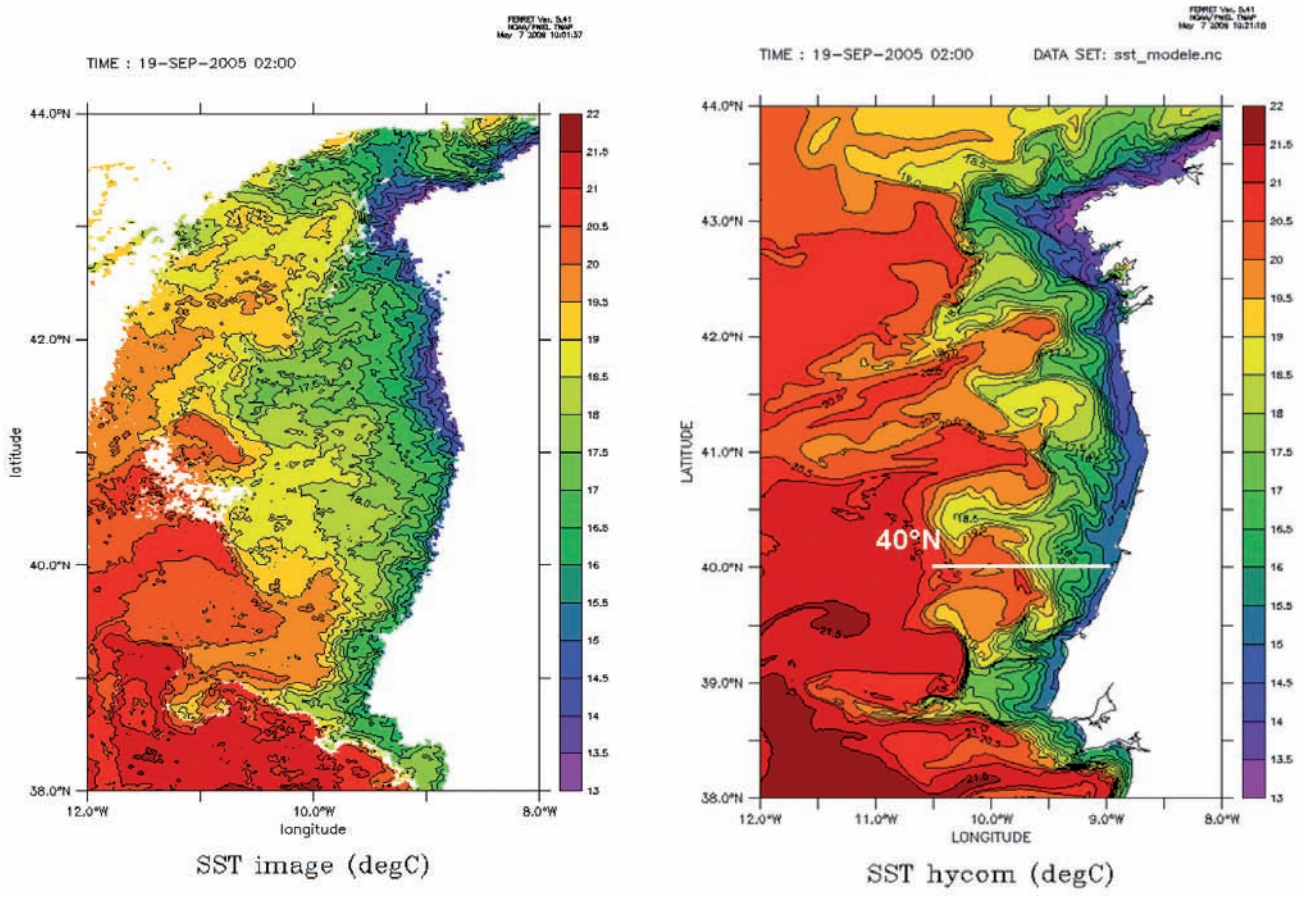


Figure 13 : Température de surface le 19 septembre 2005 observée par satellite (à gauche) et donnée par le modèle HYCOM sur la région Ouest Portugal. Noter le fort refroidissement à la côte (la température passe de 22°C au large à 13°C à la côte), marquant le phénomène d’upwelling. Noter aussi les filaments et méandres qui se détachent de la côte.

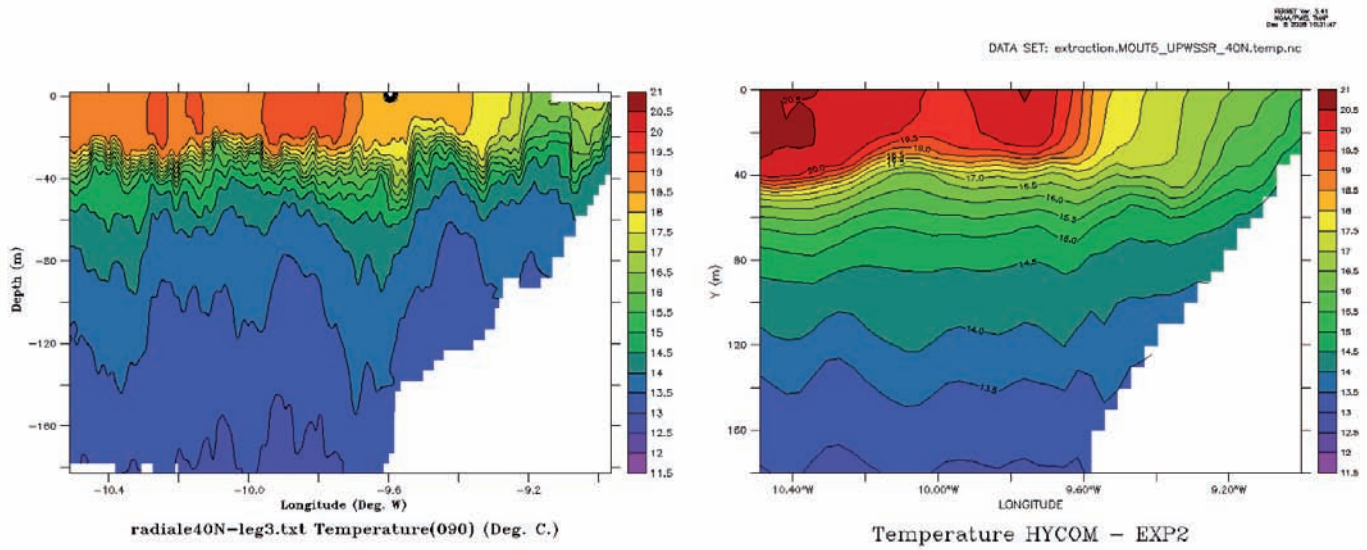


Figure 14 : Coupe verticale de température à 40° N observée lors de la campagne MOUTON2005-3 (à gauche) et modélisée par HYCOM (à droite). Noter la remontée d’eaux froides provenant des couches profondes à la côte. Noter que le modèle semble trop chaud sur l’ensemble de la colonne d’eau.

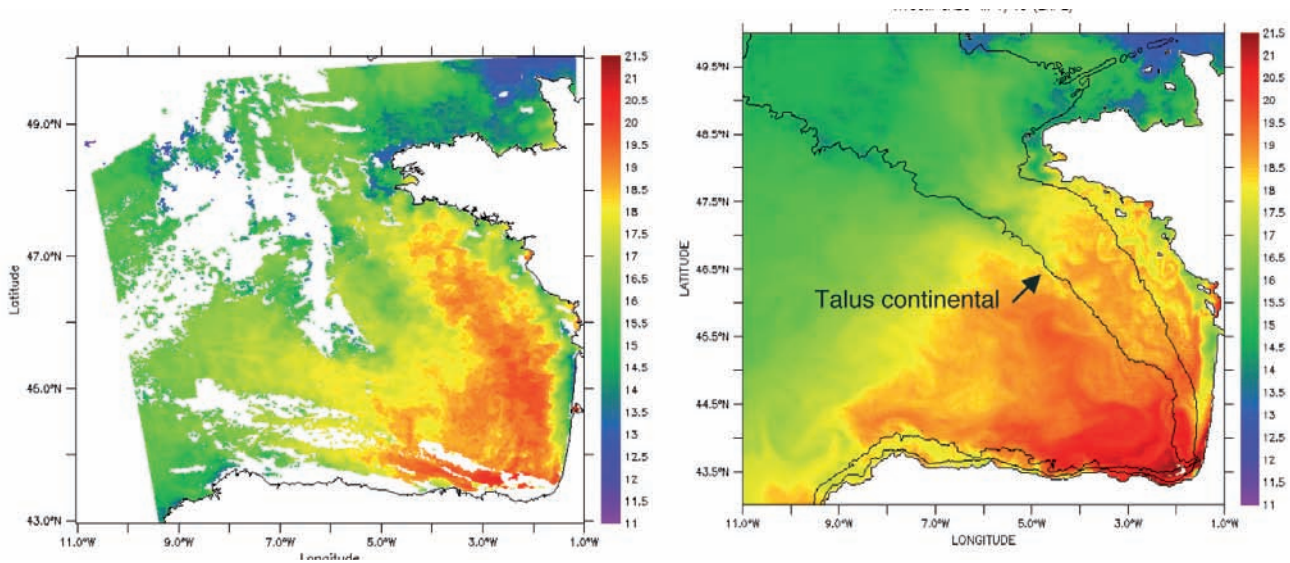


Figure 15 : Température de surface en juin 2004 observée par satellite (à gauche) et donnée par le modèle HYCOM sur la région Manche-Gascogne (à droite).

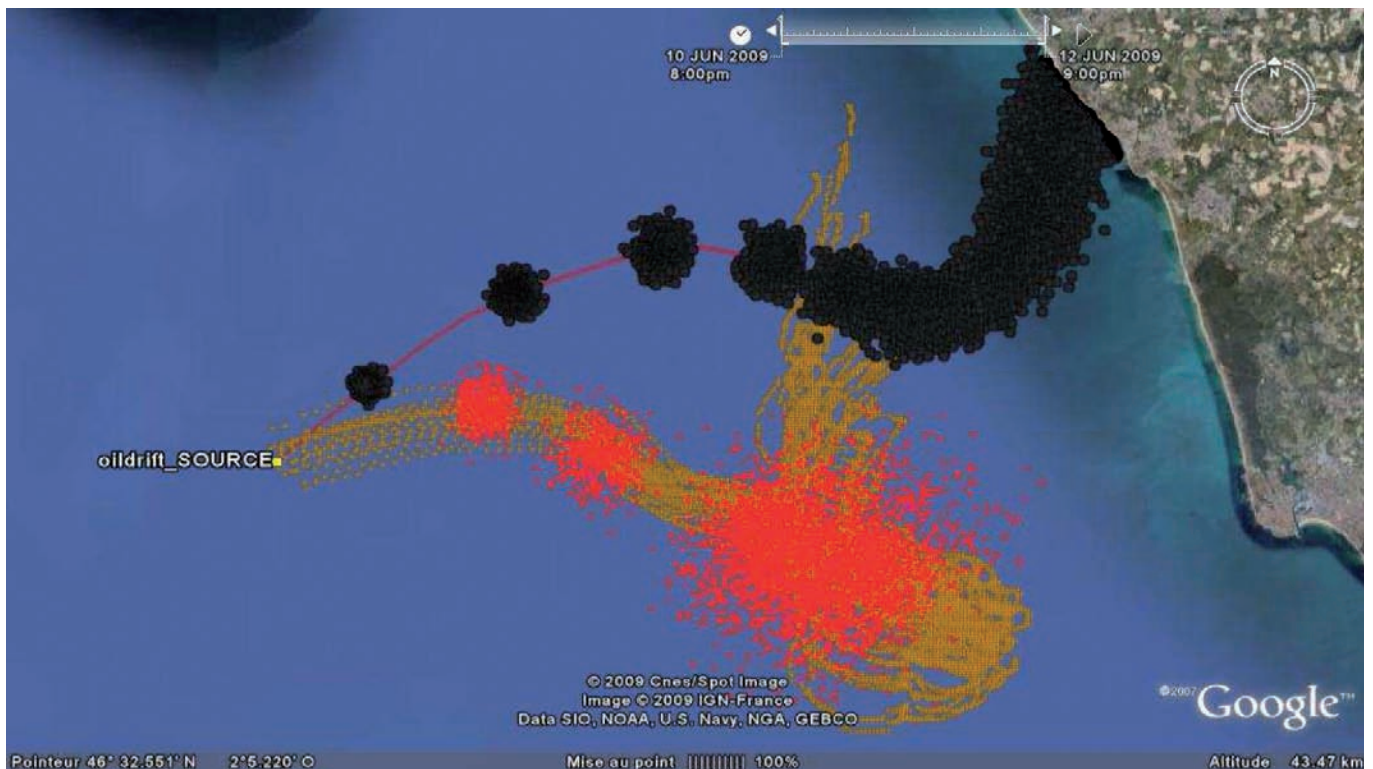


Figure 16 : Trajectoires de polluants donnés par le modèle opérationnel de Météo-France, MOTHY, (en rouge), le modèle HYCOM « temps réel » (marron) et un troisième modèle. Noter la bonne concordance entre le modèle HYCOM et MOTHY.

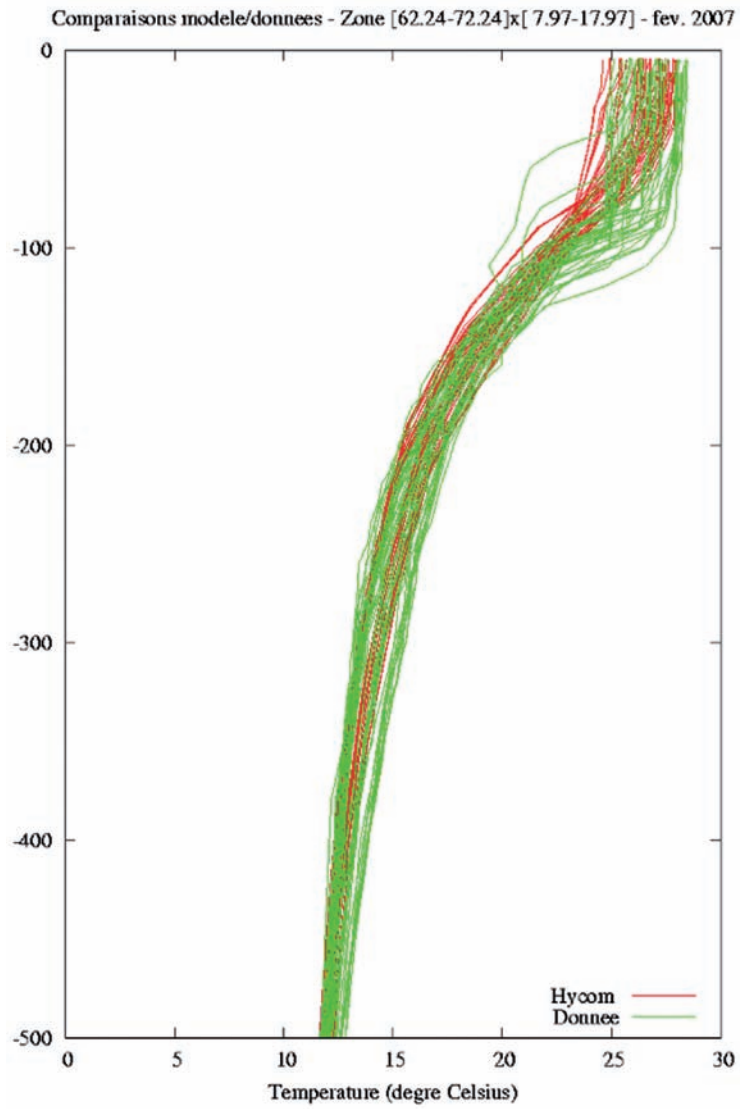


Figure 17 : Comparaison modèle/mesures (modèle en rouge, observations en vert) sur la mer d'Arabie lors de l'exercice GAN07.