

Rapport de stage de fin d'études n° 1048

**Optimisation du calcul des courants de marée
dans le modèle MOTHY**



*Cécile Marie-Luce
Tahiariki Lee*

Projet d'application

réalisé à la Division Marine et Océanographie,
Direction de la Prévision,
Toulouse, France,
sous la direction de Pierre Daniel,
du 9 mai au 23 juin 2006

Promotion d'élèves Techniciens Supérieurs Exploitation de l'ENM 2004/2006
2006

Cécile Marie-Luce et Tahiariki Lee – TSE 2^e année – Projet d'application
Optimisation du calcul des courants de marée dans le modèle MOTHY

Résumé

Au cours de ces dernières années, les côtes françaises ont été souillées par des dépôts d'hydrocarbures, amenés par des naufrages de navires ou des dégazages sauvages. La Division Marine et Océanographie a développé un modèle de dérive MOTHY (Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures), dont une première version déjà validée sert d'outil pour prévoir le déplacement des pollutions marines. Ce système est constitué d'un modèle d'océan à domaine limité, forcé par le vent et la marée, et d'un modèle de polluant. En effet, la marée joue un rôle majeur dans la dérive des nappes d'hydrocarbures. Sa modélisation est donc prépondérante. Dans la version validée, le phénomène de marée n'est pris en compte que sur certaines zones prédéfinies, en fonction de la position des marégraphes disponibles, ce qui limite les domaines de calcul. Pour avoir les courants de marée sur tout le globe, le mode de calcul de la marée a été modifié. Pour cela, le forçage de la marée a été changé. Dans la nouvelle version, ce forçage est issu du modèle numérique du LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Dans le but de valider cette nouvelle version, nous avons comparé les hauteurs de marée calculées par la seconde version avec des hauteurs de référence ainsi qu'avec les valeurs fournies par la première version. Ceci nous a permis de mettre en évidence une meilleure prise en compte du calcul de la marée dans la nouvelle version, et également les domaines permettant d'optimiser ce calcul.

Remerciements

Nous tenons à remercier Denis Paradis, adjoint sur le poste de « Recherche et Développement » à la Dprévi/Mar (Division Marine et Océanographie, Direction de la Prévision), ainsi que les membres de l'équipe de Dprévi/Mar pour leur accueil, leur gentillesse, et leur disponibilité.

Nous remercions particulièrement notre encadrant Pierre Daniel pour sa disponibilité et pour nous avoir guidées tout au long de ce projet, ainsi que Sergey Varlamov, un des développeurs de la nouvelle version de MOTHY.

Et nous tenons également à remercier les membres du SHOM pour leur collaboration.

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Remerciements	4
Introduction	8
Première partie : présentation générale	10
1. Cadre de travail	10
2. Phénomène de marée	10
2.1. Définition de la marée	10
2.2. Les types de marées	11
2.3. Origine de la marée	12
2.3.1. La force génératrice de la marée	12
2.3.2. Influence de la position des astres sur le marnage	13
2.4. Les références de hauteur	13
3. Prévision des marées	14
3.1. Méthodes de prévision	14
3.2. Les modèles	14
3.2.1. Le modèle MOTHY V.1	14
3.2.2. La nouvelle version : MOTHY V.2	16
3.2.3. Le modèle du SHOM	17
4. Les domaines spatiaux d'étude	18
5. Les points de calcul de la marée	19
6. Obtention des données issues de MOTHY	19
6.1. Le programme MOTHY V.2	19
6.1.1. Architecture	19
6.1.2. Données d'initialisation	20
6.2. Les résultats obtenus	21
7. Obtention des données issues du SHOM	21
8. Le programme d'extraction des données	21
Deuxième partie : analyse des résultats	22
9. Les paramètres statistiques utilisés	22
9.1. Le biais	22
9.2. L'erreur quadratique moyenne	23
10. Estimation des erreurs	23
10.1. Estimation du déphasage temporel	23
10.2. Estimation de l'erreur sur l'amplitude	23

11.	Comparaison entre le modèle du SHOM et MOTHY V.1.....	24
11.1.	Analyse des résultats	24
11.2.	Bilan	25
12.	Comparaison entre le modèle du SHOM et MOTHY V.2.....	26
12.1.	Analyse des résultats	26
12.1.1.	Dunkerque	27
12.1.2.	Boulogne-sur-Mer.....	29
12.1.3.	Le Havre	29
12.1.4.	Saint-Malo	30
12.1.5.	Brest.....	31
12.1.6.	Les Sables d'Olonne	33
12.2.	Bilan	33
13.	Comparaison entre les modèles MOTHY V.2 et MOTHY V.1.....	34
13.1.	Analyse.....	34
13.2.	Bilan	36
14.	Etude du calcul de la marée pour les points en mer.....	37
14.1.	Pas de Calais.....	37
14.2.	La Hague	38
14.3.	Iroise.....	38
14.4.	Bilan	38
15.	Etude partielle sur la dérive	39
15.1.	Méthode de calcul	39
15.2.	Lâcher n°1	39
15.3.	Lâcher n°2	41
15.4.	Bilan	42
	Synthèse générale	44
	Conclusion.....	46
	Bibliographie	48
	Listes des figures.....	50
	Listes des tableaux.....	52
	Listes des sigles et acronymes.....	54
	Annexe.....	56
	Position des marégraphes sur le domaine GAMA	56
	Forçage de la marée avec les données du LEGOS	56
	Niveau Moyen des différents ports.....	57
	Cartes des domaines	57
	Position des points.....	60
	Code du programme de traitement des données	61

Introduction

Les marées océaniques représentent plus de 80% de la variabilité de la surface libre en plein océan (cf. site Internet, [12]). Le long des côtes, les variations du niveau de la mer et des courants qu'elles engendrent sont complexes. Pour mieux comprendre ce phénomène, il est donc important que la modélisation de la marée sur tout le globe soit la meilleure possible.

Dprévi/Mar (Division Marine et océanographie de la Direction de la Prévision) a développé un modèle de dérive de polluants en mer : le modèle **MOTHY V.1** (Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures Version 1). Ce système est constitué d'un modèle d'océan à domaine limité, forcé par le vent et la marée, et d'un modèle de polluant.

Jusqu'à présent, près des côtes françaises de Manche et d'Atlantique, le calcul des courants de marée est effectué par ce modèle sur des domaines de calcul de haute résolution de maille 1 minute d'arc imbriqués dans un domaine de plus grande taille de maille 5 minutes d'arc. Le forçage de la marée se fait par une condition aux limites ouvertes du domaine de calcul de maille 5 minutes d'arc. Cette condition aux limites utilise des données de marée issues de mesures marégraphiques. Les longitudes et latitudes définissant la largeur du domaine ont donc été choisies en fonction de la position géographique des marégraphes. Le forçage atmosphérique est fourni par deux modèles : le modèle ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) et le modèle IFS (Integrated Forecast System) du CEPMMT (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme).

Récemment, une nouvelle version du modèle, **MOTHY V.2** (Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures Version 2), a été développée. Les conditions aux limites sont maintenant calculées à partir de données issues d'un modèle de marée global, et permettent donc un choix plus large de domaines géographiques. De plus, cette nouvelle version peut prendre en compte les données issues du modèle Aladin (Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational).

Le développement de la deuxième version de MOTHY représente un enjeu important. Il est espéré que cette nouvelle version permettra, d'améliorer la précision du calcul de la marée près des côtes françaises, et d'affiner ainsi la prévision des trajectoires de polluants. En raison des nombreuses marées noires ayant touché la France, et plus généralement les côtes européennes ces dernières années, mieux cibler les risques encourus par les domaines côtiers représente un défi majeur pour la société.

L'objectif de ce stage est d'apprécier la bonne prise en compte du calcul de la marée dans la nouvelle version, et de définir les meilleurs domaines dans lesquels le modèle MOTHY V.2 calculera des hauteurs d'eau proches de celles obtenues à l'aide du modèle du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) qui fait foi en la matière. Après avoir brièvement présenté notre cadre de travail ainsi que quelques notions sur les marées (première partie), nous évaluons la bonne prise en compte du calcul de la marée dans le modèle MOTHY V.2, en le comparant avec ceux issus des modèles du SHOM et MOTHY V.1. Pour ce faire nous travaillons sur des domaines prédéfinis. Sur chacun des domaines, neuf points de mesures sont placés (six aux abords côtiers et trois au large). Nous comparons les hauteurs d'eau calculées au niveau des six points côtiers, sur les différents domaines, pour les deux versions du modèle MOTHY avec les données du SHOM. Pour les trois points en mer, nous comparons les données issues de MOTHY V.2 avec les données de MOTHY V.1 que nous prenons comme référence (deuxième partie). Pour cela, nous disposons des données issues des modèles MOTHY V.1, MOTHY V.2 et SHOM par pas de dix minutes, sur la période allant du 15 avril 2006 à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures. Pour finir, nous apportons des suggestions afin d'améliorer le calcul de la marée dans cette nouvelle version.

Première partie : présentation générale

Dans cette partie, nous présentons notre cadre de travail, et définissons quelques notions sur la marée, les modèles et les méthodes utilisés au cours de cette étude.

1. Cadre de travail

La météorologie marine et la surveillance de l'océan superficiel font partie des missions essentielles de Météo-France (décret fondateur, 1993). Cette mission est assurée principalement par la Dprévi/Mar. Cette division est organisée autour de deux services complémentaires, l'un chargé de l'exploitation/production et l'autre chargé de la coordination, la recherche et le développement. Trois postes (deux permanents et un semi-permanent) sont nécessaires pour assurer la tâche de prévision : un ingénieur des travaux s'occupant des zones larges pour l'Atlantique, la Manche et la mer du Nord, un technicien d'exploitation pour les zones larges de la Méditerranée, et un technicien d'exploitation responsable des zones grands larges et des assistances sur tout le globe. Le service de recherche et de développement produit des outils d'aide à la production, mais également des modèles de prévision de surcotes, de prévision de l'état de la mer, et des prévisions de dérives.

2. Phénomène de marée

2.1. Définition de la marée

La marée est le phénomène périodique de montée et de baisse du niveau de la mer dû à l'action des astres (essentiellement de la Lune et du Soleil). Autrement dit, la marée est un phénomène périodique et d'origine astronomique.

Tout d'abord le niveau de la mer s'élève pendant un certain temps (six heures environ sur les côtes françaises). C'est ce qu'on appelle le **flux** ou **montant**, jusqu'à atteindre un maximum appelé **pleine mer**. Ensuite ce niveau baisse pendant un certain temps ; c'est ce que l'on appelle le **reflux** ou **perdant**, jusqu'à atteindre son minimum appelé **basse mer**. La différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer consécutives (ou inversement) s'appelle le **marnage**. Cette différence est très variable dans le temps et dans l'espace. En effet, le marnage est maximal lors des **vives-eaux** et minimale lors des **mortes-eaux** : c'est l'inégalité semi-mensuelle. Les marées sont très faibles dans les mers fermées et au milieu des océans, alors qu'elles sont plus importantes près des côtes.

La mer oscille autour d'une position moyenne appelé **niveau moyen** (cf. figure 2.1). On distingue :

- **le niveau de mi-marée** : moyenne d'une pleine mer et d'une basse mer consécutives ;
- **le niveau moyen journalier** : moyenne des hauteurs de la journée ;
- **le niveau moyen mensuel** : moyenne des hauteurs du mois ;
- **le niveau annuel** : moyenne des hauteurs de l'année.

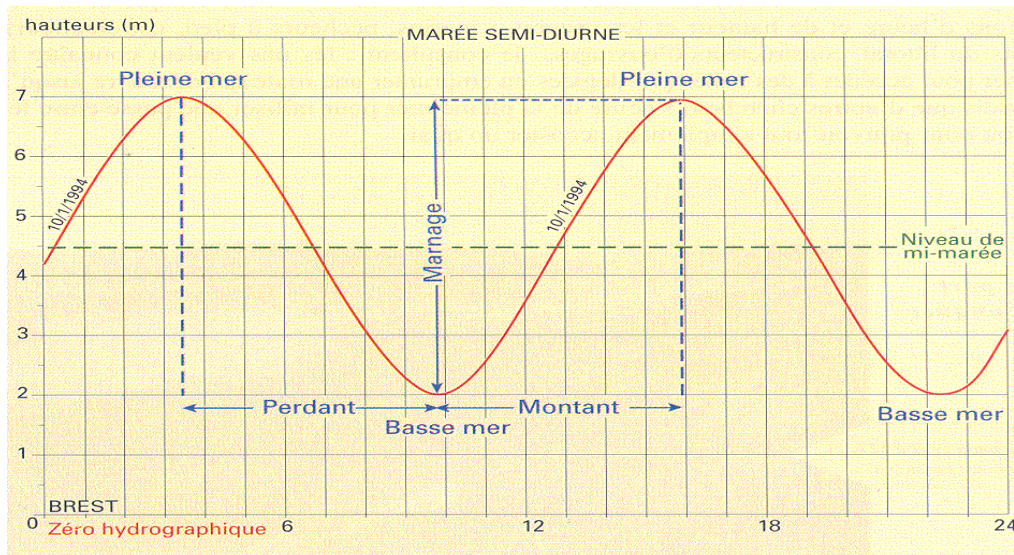


Figure 2.1 : Courbe de marée pendant 24 heures : figure tirée de l'ouvrage « La marée. » (SHOM, 1997 [2]).

2.2. Les types de marées

Selon les régions, on peut observer quatre types de marées (cf. figure 2.2) :

- **la marée semi-diurne** : au cours de la journée, on observe deux pleines mers et deux basses mers d'importances sensiblement égales par jour. Ce type de marée est prépondérant sur les côtes européennes et en océan Atlantique ;
- **la marée diurne** : il y a une pleine mer et une basse mer par jour. Ce type de marée est assez rare. On la rencontre principalement dans l'océan Pacifique et sur les côtes de Sibérie orientale où l'on observe les plus forts marnages diurnes ;
- **la marée semi-diurne à inégalité diurne** : c'est un cas intermédiaire entre les deux marées précédentes. La marée présente deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les hauteurs des pleines mers ou des basses mers consécutives peuvent être très différentes. On observe cette marée dans l'océan Indien et en un certain nombre de ports de l'océan Pacifique ;
- **la marée mixte** : c'est un autre cas intermédiaire. Il y a tantôt deux pleines mers et deux basses mers par jour (lorsque la Lune est à l'équateur), et tantôt une pleine mer et une basse mer par jour (lorsque la déclinaison de la Lune est proche de son maximum). Ce type de marée est fréquent en Indonésie, au Viêt Nam, en Indochine, sur les côtes de Sibérie et d'Alaska mais également aux Antilles, par exemple à Fort-de-France.

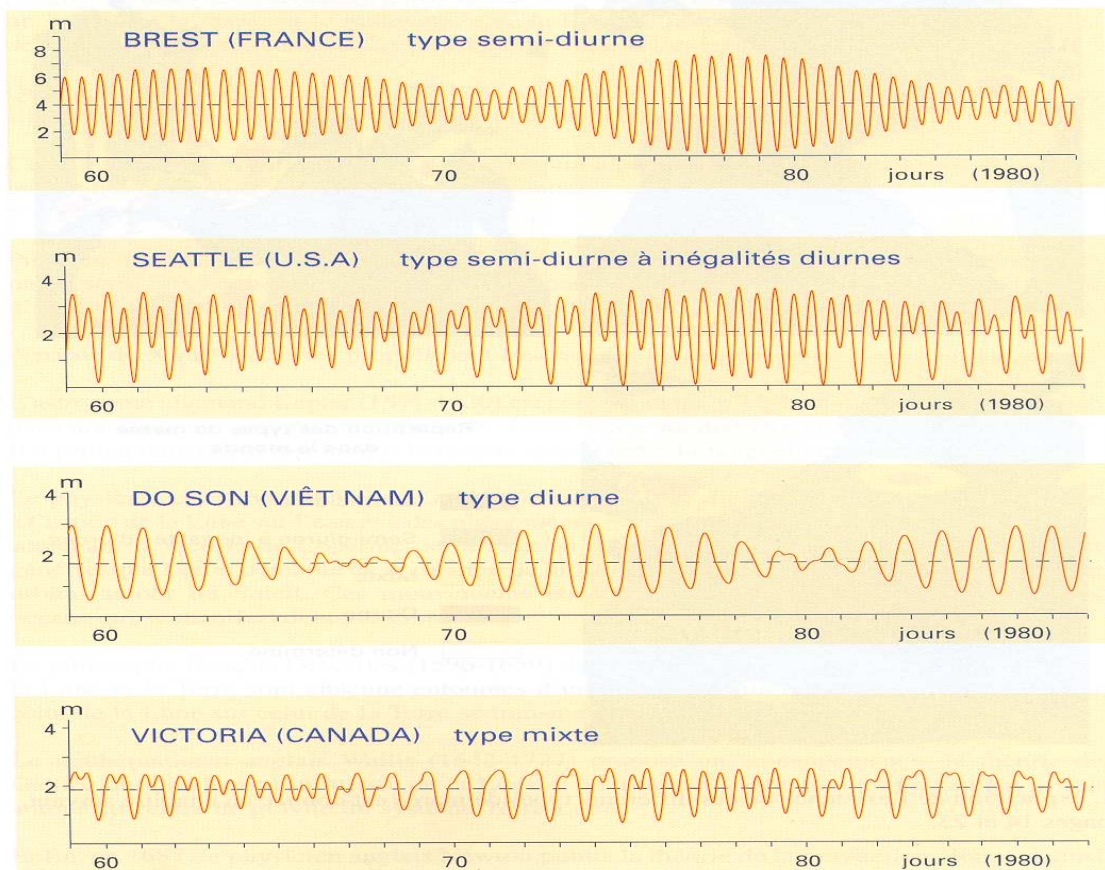


Figure 2.2 : Courbes des différents types de marée pendant une lunaison : figure tirée de l'ouvrage « La marée. » (SHOM, 1997 [2]).

2.3. Origine de la marée

2.3.1. La force génératrice de la marée

La marée astronomique est une manifestation de la loi de la gravitation universelle appliquée au système formé par la Terre, le Soleil et la Lune. La force génératrice de la marée est la résultante de deux forces :

- la force d'attraction gravitationnelle exercée par l'astre (F_r et F_d) (cf. figure 2.3), proportionnellement à sa masse et à l'inverse du carré de sa distance ;
- la force centrifuge (F_i) identique en tout point de la Terre, due au mouvement de la Terre sur son orbite autour du centre de gravité du système Terre-astre.

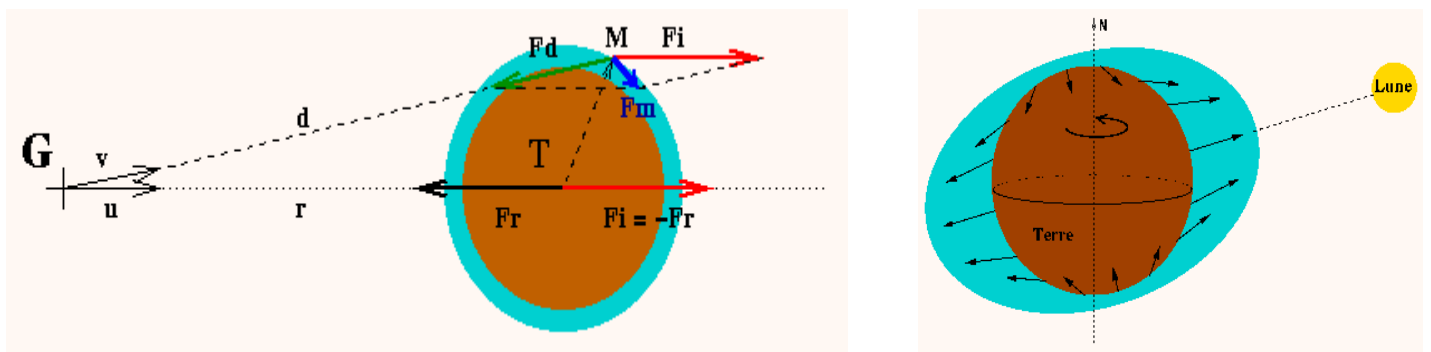


Figure 2.3 : Force génératrice de la marée (à gauche) et répartition de la force génératrice (à droite), figures tirées de l'ouvrage « La marée. » (SHOM, 1997 [2]).

Pour un corps situé au centre de la Terre, ces deux forces se compensent exactement et il y a équilibre. Mais ailleurs, il n'y a pas cet équilibre et c'est cela qui produit la force génératrice de la marée (cf. figure 2.3). Lorsque l'astre est au-dessus de l'horizon, c'est la force d'attraction qui l'emporte, et lorsque l'astre est au-dessous de l'horizon, la force centrifuge est prépondérante.

2.3.2. Influence de la position des astres sur le marnage

En fonction de la position des astres, la marée est plus ou moins importante. On observe de fortes amplitudes lorsque la Lune et le Soleil sont en conjonction (nouvelle Lune) (figure 2.4) ou en opposition (pleine Lune) (figure 2.4), on parle alors de grandes marées ou de marées de vives-eaux.

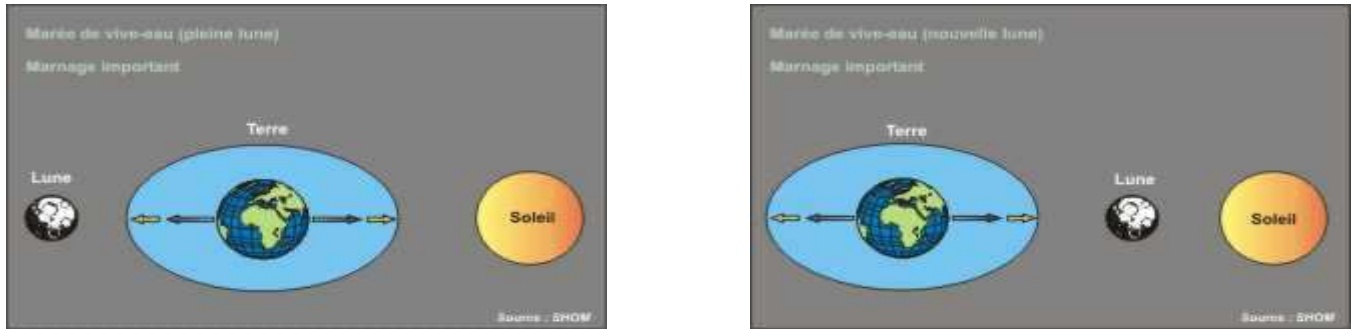


Figure 2.4 : Nouvelle Lune (à gauche) et pleine Lune (à droite).

A l'inverse, lorsque la Lune et le Soleil exercent leur force dans des directions perpendiculaires au cours du premier et dernier quartier (cf. figure 2.5), le marnage est faible. On parle alors de marées de mortes eaux.

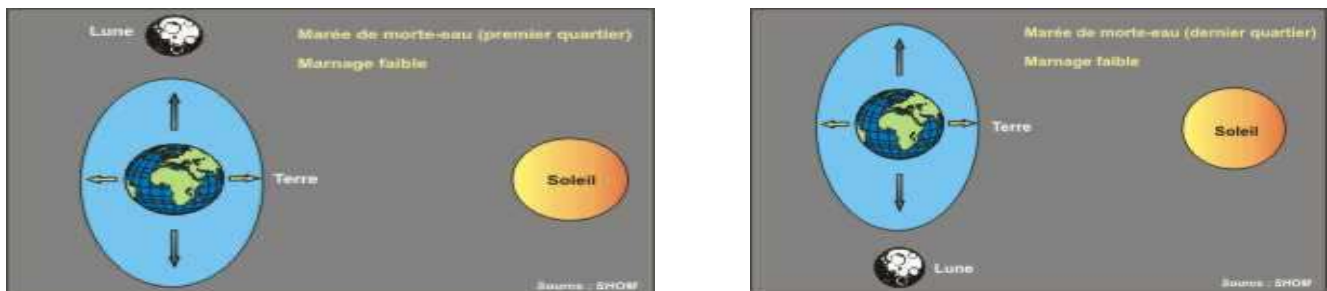


Figure 2.5 : Premier quartier (à gauche) et dernier quartier (à droite).

On notera également que le marnage varie selon la configuration topographique du lieu.

2.4. Les références de hauteur

Pour mesurer les hauteurs de la marée, il faut se fixer une référence qui doit être reconnue sans ambiguïté, c'est-à-dire que lorsque l'on donne une hauteur, on sait à partir d'où elle a été mesurée. Elle doit également être définie par rapport à des repères durables. Les deux références pour la mesure de la marée sont :

- le niveau moyen de la mer qui est la hauteur d'eau qu'on observerait en un point en l'absence de marée, dans des conditions atmosphériques standards ;

- le zéro hydrographique qui est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires de marée. Il est défini en France comme étant le niveau de la plus basse des basses mers astronomiques. Cependant, d'autres définitions sont utilisées par les services hydrographiques étrangers. On trouve par exemple le niveau des basses mers inférieures moyennes (Etats-Unis), le niveau des basses mers moyennes de vive-eau (Allemagne), etc.
Mais depuis 1996, l'OHI (Organisation Hydrographique Internationale) recommande l'utilisation de la norme utilisée en France.

3. Prévision des marées

3.1. Méthodes de prévision

Pour prévoir la marée, deux types de méthodes sont utilisées. La première est basée uniquement sur les observations des marégraphes : c'est l'analyse harmonique. Cette méthode ne permet de faire que des prévisions aux endroits où l'on a des mesures, alors que la deuxième méthode consiste à utiliser un modèle numérique de marée qui permet de faire des prévisions en tout point de la grille du modèle.

3.2. Les modèles

3.2.1. Le modèle MOTHY V.1

3.2.1.1. Présentation générale du modèle

MOTHY V.1 est le modèle de dérive de polluants en mer développé et utilisé de façon opérationnelle à Dprévi/Mar. Il peut également effectuer des calculs de marées en tout point de la grille du modèle.

Ce modèle fonctionne dans le monde entier avec une maille de 5 minutes d'arc. Il est qualifié de « **basse résolution** ».

Cependant, pour bénéficier d'une meilleure représentation de la bathymétrie et du trait de côte, il peut être activé sur des domaines géographiques limités imbriqués dans le domaine « basse résolution », et définis avec une maille inférieure : maille de 1 minute d'arc pour les côtes de France et du Portugal .

Il est alors qualifié de « **haute résolution imbriqué** ».

On remarquera que la résolution 1' est 25 fois meilleure que la résolution 5'.

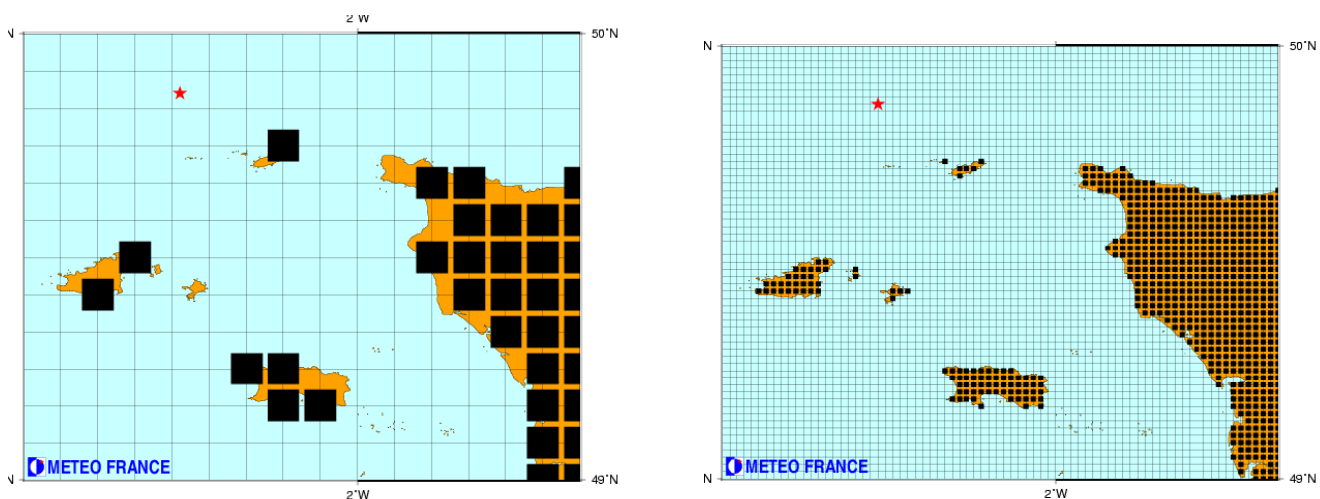


Figure 3.1 : Exemple de grilles du modèle MOTHY : grille 5 minutes d'arc à gauche et grille 1 minute d'arc à droite.

3.2.1.2. Description succincte du modèle

On considère une nappe d'hydrocarbures comme étant constituée d'un ensemble de gouttelettes indépendantes de diamètres différents. Le modèle prend en compte 480 gouttes dont les diamètres varient entre 0,3 et 1,3 mm selon une distribution adaptée au type de polluant. Chaque particule a un mouvement horizontal sous l'effet du courant et de la diffusion turbulente, et un mouvement vertical sous l'effet de la flottabilité et de la diffusion turbulente. Les grosses particules ont tendance à rester en surface, alors que les plus petites se déplacent dans la colonne d'eau.

Le modèle MOTHY V.1 est constitué d'un modèle d'océan, développé pour représenter le mieux possible le courant de surface, et d'un modèle de nappe. Le modèle d'océan est un modèle 2,5D : modèle 2D couplé à un modèle 1D.

Le modèle 2D

Ce modèle à deux dimensions dit « **barotrope** » et intégré sur la profondeur donne le courant moyen sur la colonne d'eau. Il est forcé par les paramètres suivants :

- le vent et la pression atmosphérique qui sont fournies par les prévisions du modèle IFS, celles du modèle ARPEGE (au large des côtes françaises), et celles du modèle Aladin Qatar (dans le golfe Persique) ;
- les courants de grande échelle qui ne sont pas négligeables en Méditerranée ;
- la bathymétrie dont les fichiers de profondeurs au large des côtes françaises ont été obtenus à partir des cartes du SHOM et de sources divers (IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), SHOM, et LEGOS), et à partir d'une base de données globale ailleurs ;
- la marée qui n'est prise en compte que dans la Manche, le golfe de Gascogne, la mer du Nord, la zone Ouest Portugal, en mer Rouge et dans le golfe Persique. Le modèle est initialisé à partir des données de 13 marégraphes sur le domaine golfe de Gascogne–Manche (cf. figure I.1 en annexe I), et de 17 sur le domaine golfe de Gascogne–Manche–mer du Nord. Ils forcent le modèle en terme d'élévation aux points où ils sont situés à partir des constantes harmoniques d'un nombre fini d'ondes de marée (9 ondes). Pour laisser le temps aux ondes issues des marégraphes de se propager sur l'ensemble du domaine et de se stabiliser, on fixe une durée d'initialisation à 96 heures.

Le modèle 1D

Ce modèle à une dimension calcule le profil de courant horizontal à partir d'un profil de viscosité turbulente, sous la contrainte de la tension du vent en surface, du frottement au fond et du courant moyen calculé par le modèle 2D.

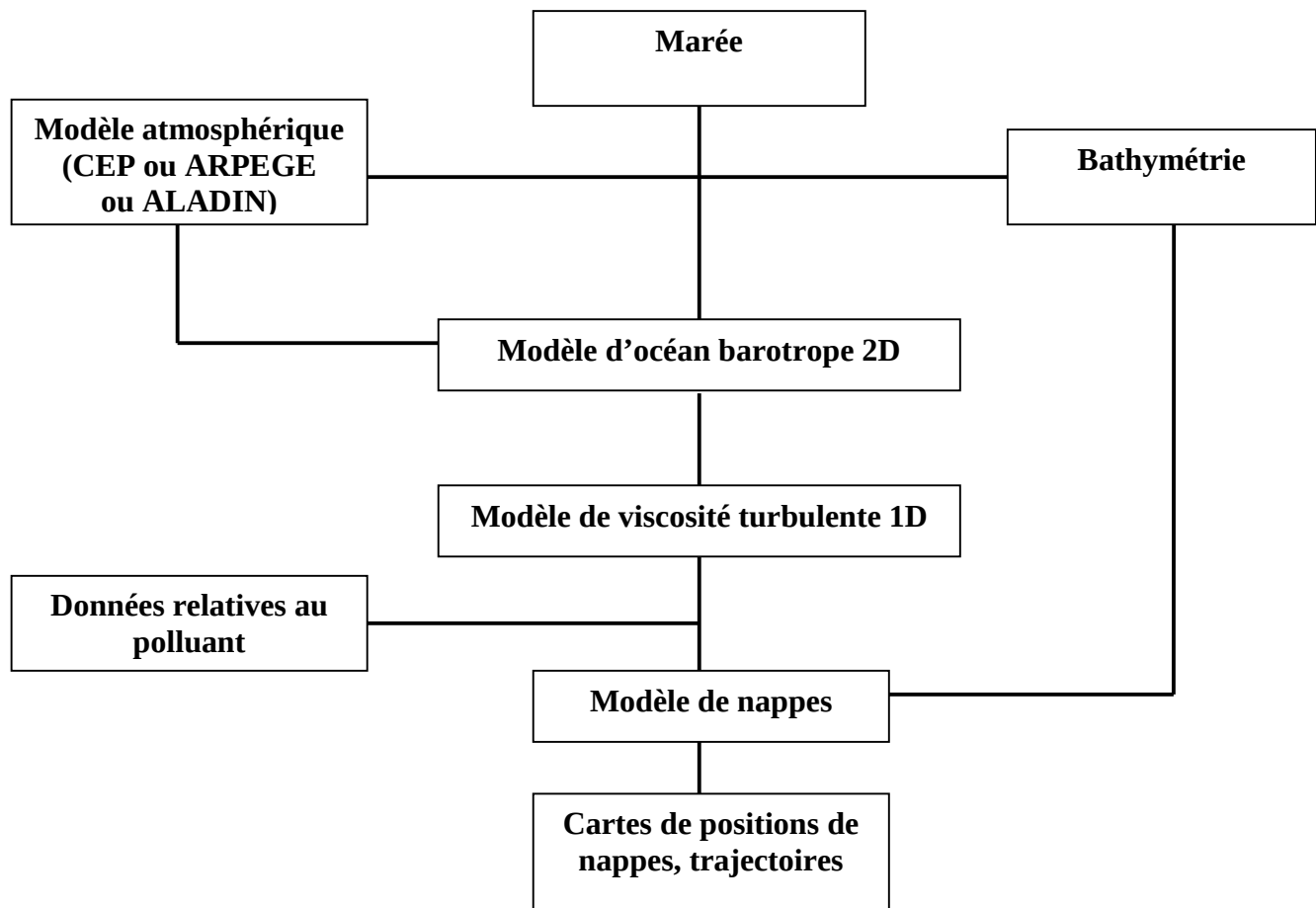


Figure 3.2 : Schéma d'ensemble des modèles de dérive de polluant.

3.2.2. La nouvelle version : MOTHY V.2

Le modèle MOTHY V.2 possède certaines caractéristiques du modèle MOTHY V.1, mais il présente également quelques différences.

Concernant l'initialisation de la marée, elle n'est plus effectuée à partir des marégraphes, mais elle est issue du modèle de marée globale FES2002 du LEGOS. C'est un modèle basé sur les éléments finis, dont l'assimilation de données marégraphiques et/ou altimétriques fournies par les satellites TOPEX/POSEIDON (Topographie de l'expérience Océan) et ERS (European Remote Sensing satellite) permet d'obtenir des solutions globales de marée de précision centimétrique en plein océan et décimétrique en zones côtières. Le forçage se fait donc aux bords du domaine en un nombre fini de points (points tous les $0,25^\circ$) (cf. figure I.2 en annexe I) par les harmoniques dominantes des ondes de marée (11 harmoniques avec FES2002). Donc dans cette nouvelle version, il est possible d'effectuer des calculs sur des domaines 1' non imbriqués. Concernant les domaines imbriqués, la méthode d'interpolation est la même que celle utilisée dans MOTHY V.1, les hauteurs d'eau sur les bords sont interpolées à partir du domaine « basse résolution ». Pour l'initialisation du vent et de la pression, le forçage atmosphérique peut également être fourni par le modèle Aladin. Ce modèle ne peut être utilisé dans MOTHY V.1 car sa maille n'est pas un multiple de la maille du domaine 1' d'arc ou 5' d'arc.

3.2.3. Le modèle du SHOM

3.2.3.1. Le SHOM

En France, le SHOM est l'organisme officiel qui recueille, valide, expertise, archive, coordonne et traite les informations marégraphiques nationales. C'est également l'organisme qui effectue les calculs et édite les documents officiels de prévision des marées pour la navigation maritime. Pour ce faire, il utilise une version simplifiée du modèle TELEMAC 2D et des données issues des marégraphes.

3.2.3.2. Description succincte de TELEMAC 2D

Le SHOM utilise actuellement pour le calcul de la marée une version simplifiée du modèle TELEMAC 2D. Ce modèle est dit en eau peu profonde ou « shallow water », car il utilise les équations de Saint-Venant valables sur une faible profondeur. Il a été développé par le LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement) d'EDF (Electricité De France), et permet de simuler les écoulements à surface libre à deux dimensions d'espace horizontales. Ce logiciel calcule en chaque point du maillage la hauteur d'eau ainsi que les deux composantes horizontales et verticales de la vitesse. Il est dit « aux éléments finis », car il utilise des mailles triangulaires qui permettent une plus grande souplesse, la taille des mailles pouvant s'adapter à la variabilité du milieu et à la complexité du trait de côte. Certaines mailles, en particulier aux abords des ports, ont des dimensions de l'ordre d'une dizaine de mètres (cf figure 3.3). Il diffère ainsi de la grille régulière de MOTHY de résolution 1 à 5 minutes selon le domaine considéré. Ce modèle barotrope force les bords du domaine par des élévations dues aux principales ondes de marée, et fait non seulement appel pour ce forçage à des données issues de marégraphes, mais également à des sorties de modèle numérique ainsi qu'à des mesures satellitaires.

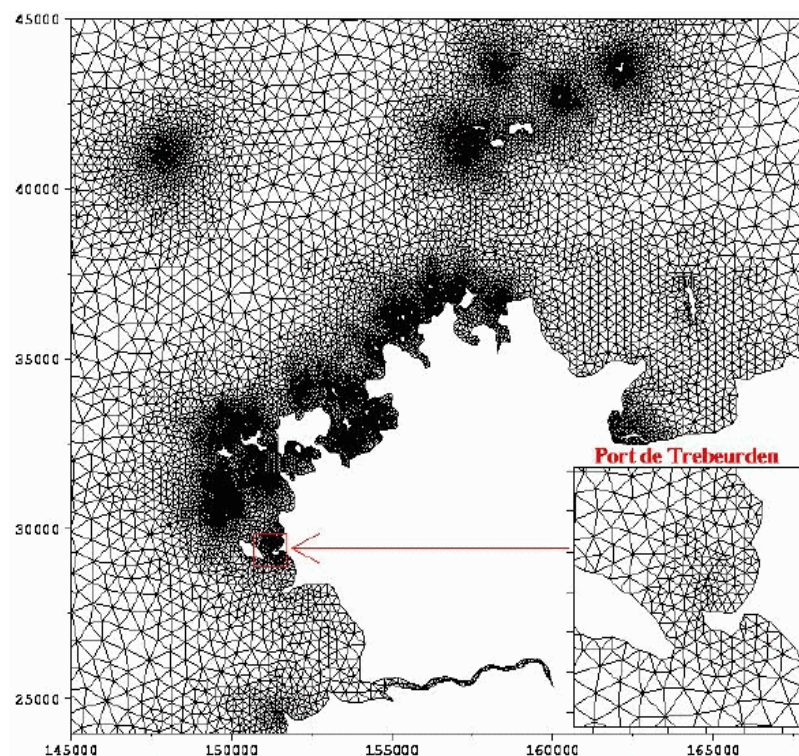


Figure 3.3 : Extrait du maillage de TELEMAC 2D pour le modèle « Nord-Bretagne ».

4. Les domaines spatiaux d'étude

Pour notre étude, il est important de définir différents domaines spatiaux de calcul plus ou moins grands, imbriqués ou non. Pour cela, nous avons le choix entre différents domaines déjà prédéfinis en fonction de la bathymétrie disponible. Ce choix a également été fait en prenant en compte la position des différents points de calcul. Nous avons donc choisi de travailler sur les 16 domaines suivants :

- le domaine 5' golfe de Gascogne–Manche–mer du Nord (**GAMAME**) ;
- le domaine 5' golfe de Gascogne–Manche (**GAMA**) ;
- le domaine 5' **ALADIN** ;
- les domaines 1' imbriqué, non imbriqué de la baie de Seine (**SEINE**) (I) ;
- les domaines 1' imbriqué, non imbriqué de la frontière belge à la baie de Somme (**CALAIS**) (II) ;
- les domaines 1' imbriqué, non imbriqué de la pointe de Barfleur à Bréhat (**COTENTIN**) (III) ;
- les domaines 1' imbriqué, non imbriqué de la baie du Mont Saint-Michel (**MICHEL**) (IV) ;
- les domaines 1' imbriqué, non imbriqué de l'estuaire de la Loire au sud de l'île d'Oléron (**YEU**) (V) ;
- le domaine 1' imbriqué de l'île de Batz aux Glénan (**IROISE 1**) (VI) ;
- le domaine 1' imbriqué Iroise étendu (**IROISE 2**) ;
- le domaine 1' non imbriqué Manche Est et Pas de Calais (**MPDC**).

Le domaine ALADIN est plus petit que le domaine golfe de Gascogne–Manche–mer du Nord, il ne s'étend que jusqu'au 57° Nord (cf. figure II.1 en annexe II).

Sur la figure 4.1 (à droite), on voit que les petits domaines sont essentiellement côtiers et se trouvent sur le plateau continental. Les cartes des domaines 1' sont données en annexe II.

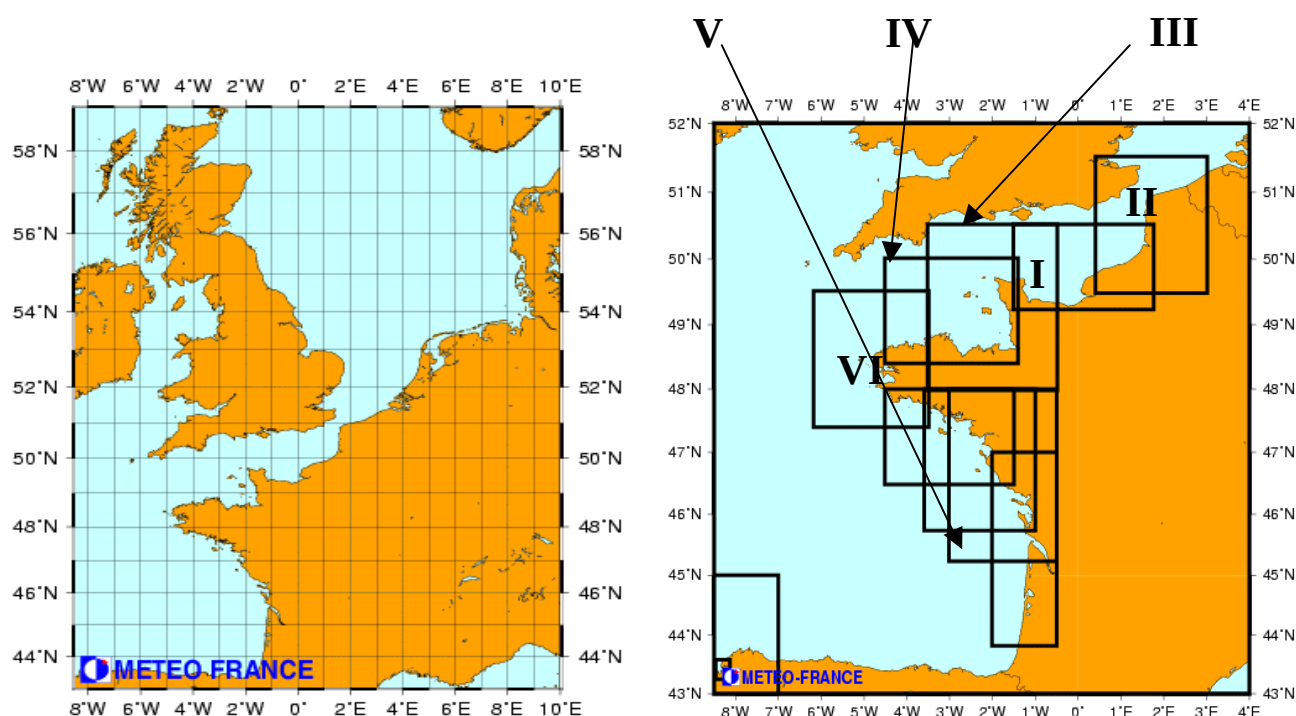


Figure 4.1 : *Domaine golfe de Gascogne-Manche-mer du Nord (à gauche) et domaine golfe de Gascogne-Manche et les petits domaines (à droite).*

5. Les points de calcul de la marée

Pour pouvoir comparer la marée issue des différentes versions du modèle MOTHY avec la marée de référence, il est nécessaire de sélectionner des points de comparaison. Ces points particuliers ont été choisis de manière à représenter le mieux possible les domaines maritimes étudiés (sur la façade Atlantique et en Manche). Nous disposons donc de données provenant de six ports et de trois points en mer dont les coordonnées sont modifiées en fonction du domaine de calcul, le maillage étant différent. Elles sont définies dans l'annexe III, mais la carte suivante (figure 5.1) permet de voir leur position sur le domaine GAMA.

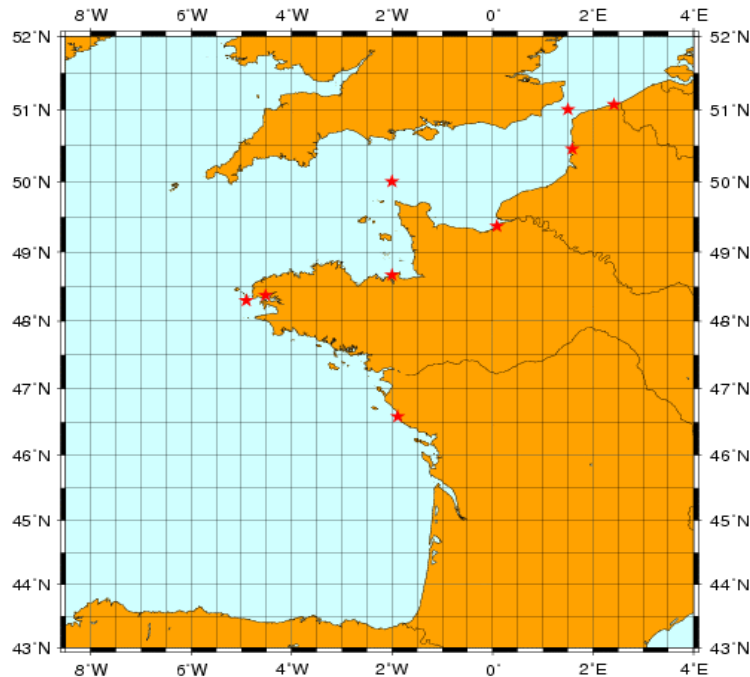


Figure 5.1 : Carte donnant la position des ports et des points en mer sur le domaine GAMA.

6. Obtention des données issues de MOTHY

6.1. Le programme MOTHY V.2

6.1.1. Architecture

Ce paragraphe présente de manière succincte l'architecture globale du modèle MOTHY V.2. Le programme principal appelle plusieurs modules :

- le module `_ser.F` qui contient les paramètres physiques fréquents ainsi que les définitions des variables communes ;
- le module `gdc_f.F` qui permet de recueillir les fichiers GRIB¹ et de les traiter ;
- le module `gdc_c.c` qui permet de gérer les problèmes de compilations car le programme nécessite l'utilisation de fonctions en langage C.

Le programme principal est le fichier source `_MOTHY.F`. Il contient, entre autres, les procédures de lecture des fichiers bathymétriques et de calcul des paramètres océanographiques, telle la hauteur d'eau.

¹ GRIB : format de fichiers pour le stockage et le transport de données météorologiques sur points de grille de modèle.

6.1.2. Données d'initialisation

La seconde version du modèle MOTHY requiert comme la version précédente des informations nécessaires à l'initialisation du programme. La majeure partie de ces informations se trouve dans le fichier « datapollu ». Ce dernier est constitué de vingt lignes :

ligne 1 : latitude, longitude du point de lâcher ;
ligne 2 : date de début de la simulation ;
ligne 3 : temps ajouté à la date de début de simulation ;
ligne 4 : durée du lâcher continu en heures ;
ligne 5 : durée totale de la simulation en heures ;
ligne 6 : type de polluant ;
ligne 7 : masse volumique du polluant (kg/m³) ;
ligne 8 : indique le type de dérive (MOTHY pour hydrocarbure ou OBJET pour objets) ;
ligne 9 : indique les courants utilisés (sm : sans marée, am : avec marée, ac : avec courants permanents) ;
ligne 10 : type de modélisation du vent ;
ligne 11 : pas de temps des données de sortie du modèle ;
ligne 12 : nom du fichier vent ;
ligne 13 : modèle utilisé pour le forçage atmosphérique ;
ligne 14 : indicateur d'imbrication ou non (BR : non imbriqué ou HR : imbriqué) ;
ligne 15 : caractère chronologique de la simulation ;
ligne 16 : profondeur maximale à appliquer au modèle de dérive d'Ekman ;
ligne 17 : dispersion autour du point initial, exprimée en degrés de latitude ;
ligne 18 : diamètres minimum et maximum des gouttes en microns ou taux d'immersion ;
ligne 19 : coefficient empirique de dérive, angle, profondeurs limites ;
ligne 20 : données externes de profondeur minimale à utiliser, profondeur maximale et nom du fichiers contenant ces données.

Les positions des points de mesures sont données par les fichiers nommés « pts » et « pts_2 », ce dernier intervenant dans le cas de l'imbrication de domaine. Chacune des lignes de ces fichiers comporte la longitude et la latitude des points de mesures en millièmes de degrés, ainsi que leur nom. Afin que le calcul de la marée soit pratiqué dans des conditions optimales, les points de mesures sont placés au plus près des côtes. Pour les simulations effectuées au cours du projet, les fichiers « pts » et « pts_2 » ont été modifiés de manière à satisfaire cette condition .

La profondeur du domaine maritime étant primordiale pour la modélisation de la marée, des fichiers bathymétriques sont également appelés par le programme. Ces fichiers contiennent les profondeurs en mètres, discrétisées sur une grille régulière en latitude-longitude. Les points de terre sont représentés par la valeur 0, les récifs 1 et les profondeurs sont comptées positivement, avec comme valeur minimale 2 mètres et la valeur maximale 9999 mètres. Pour les simulations en domaine non imbriqué, le fichier bathymétrique correspondant est copié dans le fichier « profond » ; pour les simulations en domaine imbriqué les données bathymétriques du plus grand domaine sont copiées dans le fichier « profond » et celles du plus petit domaine dans le fichier « profond2 ».

Remarque

Les coordonnées des points de calculs peuvent différer de celles contenues dans les fichiers « pts », car le modèle effectue son calcul sur le point de grille le plus proche du point enregistré dans ce fichier.

6.2. Les résultats obtenus

Le lancement de la simulation se fait par l'intermédiaire de l'exécution du fichier « MOTHY V.2 ». Les résultats de la simulation se trouvent dans les fichiers « res_1.csv » et « res_2.csv ». Les données sont obtenues par pas de temps de dix minutes, avec dans les cinq premières colonnes, l'année, le mois, le jour, l'heure et les minutes, puis dans les colonnes qui suivent, la hauteur d'eau pour les points de mesure appartenant au domaine (cf. figure 6.1). Les résultats en version imbriquée, pour le grand domaine, se trouvent dans « res_1.csv », et pour le petit domaine dans « res_2.csv ».

2006	04	20	03	50	2.091618	2.666636	1.289720	-2.745115	-0.968675	-0.700797
------	----	----	----	----	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------

Figure 6.1 : Exemple de ligne d'un fichier résultat.

7. Obtention des données issues du SHOM

Les séries temporelles de marée du SHOM pour les six ports sélectionnés sont disponibles dans l'annuaire des marées à l'adresse suivante :

http://www.shom.fr/fr_page/fr_serv_prediction/ann_marees_f.htm.

Dans cet annuaire, l'heure est exprimée en temps universel + 1 heure (UT+1) qui peut différer de l'heure en service (l'heure d'été est UT+2). Les hauteurs, comptées à partir du zéro hydrographique, sont exprimées en mètres et arrondies au centimètre. Cependant, pour faciliter la collecte de ces hauteurs, les données du SHOM disponibles sur le serveur Andante ont été préférées aux données présentes sur l'annuaire des marées. Les valeurs du SHOM se trouvant sur ce serveur diffèrent quelque peu des précédentes. Ceci peut s'expliquer par des arrondis des valeurs du niveau moyen de la mer.

Les valeurs calculées par MOTHY V.2 sont en fait des anomalies par rapport au niveau moyen de la mer. Par conséquent, pour les comparer avec les données du SHOM qui ont pour référence le zéro hydrographique, il est obligatoire de soustraire à ces dernières le niveau moyen de la mer.

Le niveau moyen est spécifique de la localisation géographique ; il diffère donc en fonction des ports (cf. annexe II).

8. Le programme d'extraction des données

Pour chaque port, un fichier qui contient la date, l'heure, la hauteur fournie par le modèle du SHOM, la hauteur calculée par le modèle MOTHY pour les différents domaines de calcul, ainsi que la différence entre les données du SHOM et celles de MOTHY (SHOM-MOTHY) pour chacun des domaines auxquels appartient le port, est créé. Pour ce faire, un programme en FORTRAN 90 appelé « traitement.f » a été mis au point (cf. codage en annexe IV).

Deuxième partie : analyse des résultats

Notre étude s'appuie sur la comparaison entre les données de hauteur d'eau issues de trois modèles : MOTHY V.1, MOTHY V.2 et le modèle du SHOM. Pour effectuer ces comparaisons, il est essentiel de choisir un modèle de référence. Il a été décidé que concernant la comparaison des hauteurs de marée fournies par le modèle MOTHY V.2 au niveau des six ports, le modèle de référence serait celui du SHOM fournissant à l'heure actuelle les valeurs les plus proches de l'observation. Et concernant la comparaison des hauteurs d'eau pour les points en mer, nous prendrons comme référence les données issues de MOTHY V.1. Après avoir fixé le modèle de référence, il est essentiel de définir des paramètres statistiques qui permettront d'effectuer ces comparaisons.

9. Les paramètres statistiques utilisés

Il est important de souligner que les séries statistiques que nous étudions sont des séries de variables quantitatives. En effet, il s'agit de données horaires concernant la hauteur de la marée (en mètre) sur la période allant du 15 avril à 12 heures au 20 avril 2006 à 12 heures. Nous disposons donc d'échantillons de 121 données.

9.1. Le biais

En fonction du domaine de travail, nous calculons le biais d'un modèle par rapport au modèle de référence, au niveau de chaque pleine mer et basse mer, sur la période définie ci-dessus. Ce biais représente l'écart entre ces deux modèles. Un biais négatif sur les pleines mers signifie que le modèle surestime les pleines mers, et un biais négatif sur les basses mers signifie que le modèle sous-estime les basses mers. Si nous comparons par exemple, une version de MOTHY et le modèle du SHOM, en notant :

- MOTHY_i : la hauteur de marée fournie par MOTHY à l'échéance i ;
- SHOM_i : la hauteur de marée fournie par le modèle du SHOM à l'échéance i ;

la formule du biais est donnée par :

$$\text{BIAIS} = \frac{1}{121} \sum_{i=1}^{121} (\text{SHOM}_{-i} - \text{MOTHY}_{-i})$$

9.2. L'erreur quadratique moyenne

Il existe un critère courant de la précision qui consiste à mesurer la distance moyenne entre deux modèles : l'erreur quadratique moyenne (eqm). Plus elle est proche de 0, plus le modèle est proche en moyenne du modèle de référence. Ainsi en reprenant l'exemple précédent, on a :

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{121} \sum_{i=1}^{121} (SHOM_i - MOTHY_i)^2}$$

Ce sont donc ces paramètres qui vont nous permettre par la suite de quantifier la précision du nouveau modèle sur le calcul de la marée.

10. Estimation des erreurs

Il est intéressant dans notre étude de trouver et de quantifier les principales sources d'erreurs des différents modèles, afin de valider les améliorations apportées par le nouveau modèle. Dans la modélisation de l'élévation du niveau de la mer, les principales erreurs sont dues à un déphasage temporel, et soit à une surestimation, soit à une sous-estimation de la hauteur d'eau par le modèle que l'on étudie par rapport au modèle de référence. C'est pourquoi nous expliquons dans la suite la méthode utilisée pour estimer ces erreurs.

10.1. Estimation du déphasage temporel

Ne disposant que de séries de données par pas de dix minutes, cette contrainte ne nous permet d'estimer le déphasage temporel que sur un pas de temps de dix minutes. Pour ce faire, la méthode consiste à décaler (avancer ou retarder) de 10 minutes, la série de données du modèle que l'on désire analyser, puis de calculer l'eqm à partir de cette nouvelle série. Si sa valeur est plus faible que celle de la série précédente, on décale (de 20 minutes), et on calcule à nouveau l'eqm sur la nouvelle série de données, et si sa valeur redevient plus grande par rapport au précédent, on conclut que le déphasage est au moins égal à 10 minutes (entre 10 minutes et 19 minutes).

10.2. Estimation de l'erreur sur l'amplitude

Pour étudier le comportement des différentes versions du modèle MOTHY, on détermine le biais sur les pleines mers de chaque série de données (celle de MOTHY et du modèle du SHOM). Si le résultat est positif, cela signifie que MOTHY a tendance à surestimer la pleine mer. Et on fait de même sur les basses mers (la période d'étude permet de travailler sur dix pleines mers et dix basses mers).

11. Comparaison entre le modèle du SHOM et MOTHY V.1

Pour savoir où se situent les faiblesses de la première version de MOTHY, nous comparons ce modèle avec celui du SHOM sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures, pour chaque port, sur différents domaines de calcul. Pour expliquer ces résultats, nous utilisons les conclusions de l'étude nommée « Les courants de marée dans MOTHY V.1 » (Billon C. *et al*, 2001, [7]).

11.1. Analyse des résultats

Le tableau ci-dessous nous donne les résultats issus des diverses simulations effectuées :

DOMAINE	DUNKERQUE	BOULOGNE	HAVRE	SAINT-MALO	BREST	SABLES D'OLONNE
GAMA	0,42	0,21	0,20	0,31	0,25	0,12
GAMAME	0,31	0,22	0,17	0,31	0,22	0,12
CALAIS IMBRIQUE	0,63	0,49				
SEINE IMBRIQUE		0,49	0,40			
COTENTIN IMBRIQUE				1,07		
MICHEL IMBRIQUE				0,84		
IROISE IMBRIQUE 1					1,08	
YEU IMBRIQUE						0,12

Tableau 11.1 : Erreurs quadratiques moyennes (en m) pour les six ports sur différents domaines entre le modèle du SHOM et MOTHY V.1 sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

Les valeurs des eqm montrent que globalement MOTHY V.1 calcule mieux les élévations sur les grands domaines. Ainsi au Havre sur le domaine GAMA, l'erreur est de 0,20 m alors qu'elle est deux fois plus grande sur le domaine 1' SEINE. Pour les Sables d'Olonne, on obtient une erreur du même ordre sur les trois domaines. Par conséquent, on peut dire que pour ce port, le forçage de la marée sur la bordure ouest des domaines est bon, ce qui n'est pas le cas à Brest. En effet, les résultats montrent que les erreurs y sont plus importantes qu'aux Sables d'Olonne. Il est intéressant de constater que les erreurs sont plus grandes sur le petit domaine IROISE 1 pour le port de Brest, ainsi que pour les petits domaines COTENTIN et MICHEL pour le port de Saint-Malo. A Brest par exemple, la figure 11.1 nous permet d'expliquer ces grandes erreurs. Elles sont dues à un déphasage temporel important, ainsi qu'à une mauvaise estimation de la hauteur d'eau (sous-estimation dans notre exemple). Les résultats montrent également que les erreurs sur le domaine GAMA et GAMANE sont du même ordre pour tous les ports, excepté à Dunkerque, où MOTHY V.1 modélise mieux la marée sur le domaine GAMANE. L'explication vient là encore du fait que le modèle est plus en retard sur le domaine GAMA (au moins 20 minutes) que sur le domaine GAMAME (au moins 10 minutes), comme on peut le voir sur la figure 11.2.

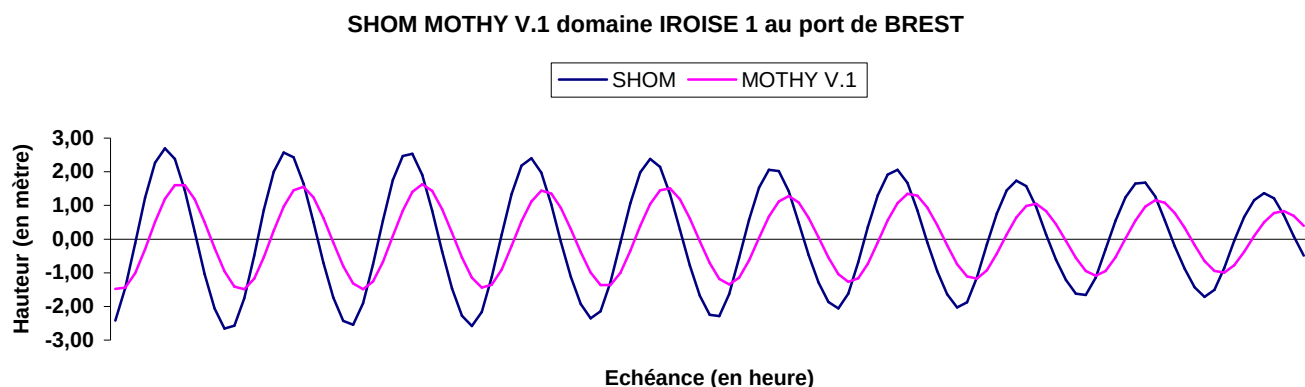


Figure 11.1 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles du SHOM et MOTHY V.1 sur le domaine IROISE 1 à Brest sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

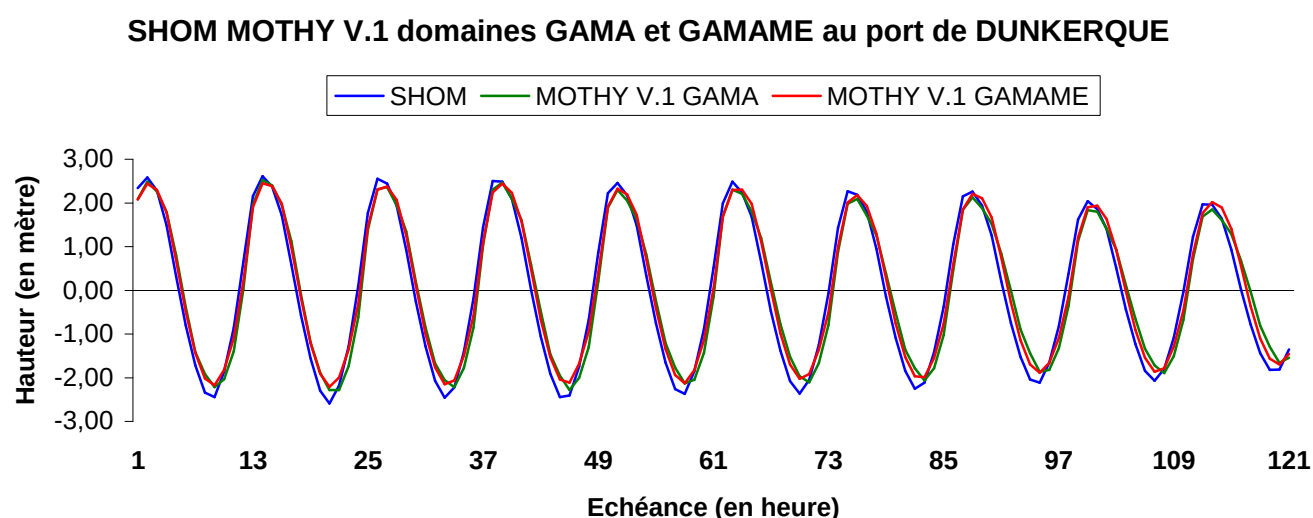


Figure 11.2 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles du SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMA et GAMAME à Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

11.2. Bilan

Le modèle MOTHY V.1 donne de meilleurs résultats sur les grands domaines. En étendant le domaine vers le nord, le modèle est plus performant. L'étude nommée « Les courants de marée dans MOTHY V.1 » (Billon C. *et al.*, 2001, [7]) explique les bons résultats de MOTHY V.1 par l'influence de l'étendue spatiale du domaine. En effet, le domaine GAMAME, de par sa superficie, possède une meilleure modélisation de la circulation des eaux contrairement au domaine GAMA. Concernant les petits domaines, cette même étude pose le problème des conditions aux limites qui génèrent ces fortes erreurs dans le calcul de la marée sur ce type de domaines. Néanmoins, le calcul de la marée dans ce modèle semble être bon sur la bordure ouest quels que soient les grands domaines. Les erreurs du modèle sont liées essentiellement à un déphasage temporel qui paraît plus important près de la mer du Nord, et sur les petits domaines.

12. Comparaison entre le modèle du SHOM et MOTHY V.2

Pour tester la bonne prise en compte du calcul de la marée par MOTHY V.2, on compare les données obtenues par MOTHY V.2 avec celles provenant du SHOM (modèle de référence) pour chaque port, sur différents domaines de calcul. Pour ce faire, nous calculons l'erreur quadratique moyenne entre le modèle du SHOM et MOTHY V.2 sur chaque domaine de calcul. Nous rappelons que pour cela, nous disposons d'échantillons de 121 données horaires.

12.1. Analyse des résultats

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats obtenus :

DOMAINE	Dunkerque		Boulogne-sur-Mer		Le Havre		Saint-Malo		Brest		Les Sables d'Olonne	
	EQM	EQM "re-phasé"	EQM	EQM "re-phasé"	EQM	EQM "re-phasé"	EQM	EQM "re-phasé"	EQM	EQM "re-phasé"	EQM	EQM "re-phasé"
GAMA	0,29	0,18	0,20	non concluant	0,15	non concluant	0,27	0,2	0,22	0,11	0,14	non concluant
GAMAME	0,63	0,15	0,19	non concluant	0,18	non concluant	0,46	0,28	0,18	0,17	0,16	non concluant
CALAIS IMBRIQUE	0,44	0,28	0,32	0,25								
CALAIS NON IMBRIQUE	0,35	0,26	0,37	non concluant								
MPDC	0,42	0,18	0,34	0,32	0,20	non concluant						
BAIE DE SEINE IMBRIQUE			0,20	non concluant	0,32	0,27						
BAIE DE SEINE NON IMBRIQUE			0,45	non concluant	0,24	non concluant						
COTENTIN IMBRIQUE							0,55	0,21				
COTENTIN NON IMBRIQUE							0,60	0,41				
MICHEL IMBRIQUE							0,55	0,23				
MICHEL NON IMBRIQUE							0,60	0,45				
IROISE IMBRIQUE 2									0,22	0,14		
YEU NON IMBRIQUE											0,19	non concluant
YEU IMBRIQUE											0,15	non concluant
ALADIN	0,64	0,18	0,19	non concluant	0,18	non concluant	0,46	0,28	0,18	0,17	0,16	non concluant

Tableau 12.1 : Erreurs quadratiques moyennes (en m) (avant et après re-phasage) pour les six ports, sur différents domaines entre le modèle du SHOM et MOTHY V.2 sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

DOMAINE	DUNKERQUE	BOULOGNE	LE HAVRE	SAINT-MALO	BREST	SABLES D'OLONNE
GAMA	-20	<10	<10	-10	20	<10
GAMAME	-40	<10	<10	-10	10	<10
CALAIS IMBRIQUE	-20					
CALAIS NON IMBRIQUE	-20	<10				
MPDC	-30	-10	<10			
BAIE DE SEINE IMBRIQUE		<10	10			
BAIE DE SEINE NON IMBRIQUE		<10	<10			
COTENTIN IMBRIQUE				-20		
COTENTIN NON IMBRIQUE				-20		
MICHEL IMBRIQUE				-20		
MICHEL NON IMBRIQUE				-20		
IROISE IMBRIQUE					-10	
YEU NON IMBRIQUE						<10
YEU IMBRIQUE						<10
ALADIN	-40	<10	<10	-10	10	<10

Tableau 12.2 : Durée de déphasage du modèle MOTHY V.2 par rapport au SHOM. Le signe - signifie que MOTHY V.2 est en retard sur le modèle du SHOM.

12.1.1. Dunkerque

A Dunkerque, les résultats montrent que le meilleur domaine de calcul est GAMA, que les deux grands domaines GAMAME et ALADIN se valent, et que le calcul sur le domaine non imbriqué donne de meilleurs résultats que sur le domaine imbriqué. On note également que c'est sur ce port que les erreurs sont les plus élevées. (A Saint-Malo les erreurs sont également élevées, à cause du marnage qui est de l'ordre de 11 m contre seulement 7 m à Dunkerque). En effet, sur ce port le modèle génère des erreurs importantes et celles-ci sont dues à un retard important du modèle sur celui du SHOM. Nous pouvons observer ce retard sur la figure 12.1, où l'on voit un décalage entre les deux courbes. On a pu quantifier ce déphasage sur chaque domaine et les résultats montrent que plus le domaine s'étend au nord, plus le retard est important. Ainsi sur GAMAME et ALADIN, le retard est d'au moins 40 minutes, sur MPDC d'au moins 30 minutes, alors qu'il n'est que de l'ordre de 20 minutes sur les domaines GAMA et CALAIS (cf. tableau 12.2). On remarque qu'après re-phasage, les erreurs diminuent (cf. tableau 12.1). Sur les petits domaines CALAIS, les résultats sont meilleurs sur le domaine non imbriqué car MOTHY V.2 est plus en retard sur le domaine imbriqué et qu'il a tendance à sous-estimer davantage les basses mers et à surestimer les pleines mers sur ce domaine (cf. figure 12.2). En revanche, sur le domaine non imbriqué il a tendance à sous-estimer les pleines mers (cf. figure 12.2). En effet, le biais sur les basses mers vaut -0,28 m sur le domaine CALAIS imbriqué et -0,19 m sur le domaine non imbriqué.

Les résultats sur les pleines mers, quant à eux, donnent -0,50 m sur CALAIS imbriqué et 0,26 sur le domaine non imbriqué. Les erreurs à Dunkerque sont donc essentiellement liées à un déphasage temporel, mais également à un mauvais calcul de la hauteur d'eau. Ce problème est en fait associé au forçage de la marée au bord du domaine. On a vu que plus le domaine s'étend vers le nord, plus les erreurs sont importantes, or pour le domaine imbriqué, la marée est forcée au bord du domaine GAMA, alors que sur le domaine non imbriqué elle est forcée au bord même du domaine, qui est moins étendu au nord que GAMA. La présence de points amphidromiques² sur la mer du Nord (cf. figure 12.3) rend la modélisation sur ce port très délicate. L'analyse des résultats révèle donc un problème de forçage de la marée sur le bord nord à Dunkerque.

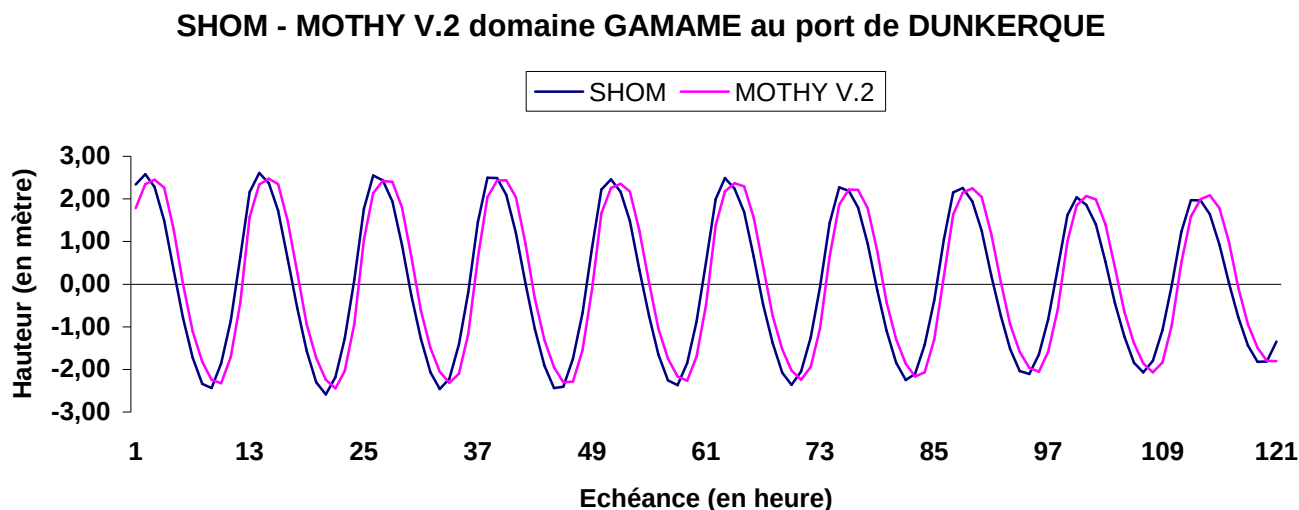


Figure 12.1 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur le domaine GAMAME au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

² Une représentation des marées sur carte consiste à tracer des lignes où la haute mer a lieu en même temps. Ces lignes s'appellent lignes cotidiales. En certains points du globe, ces lignes se concourent en des points que l'on appelle points amphidromiques. En ces points, la marée ne se fait pas ressentir, et donc, le niveau de la mer reste constant au cours du temps.

SHOM - MOTHY V.2 Domaines CALAIS imbriqué et non imbriqué au port de DUNKERQUE

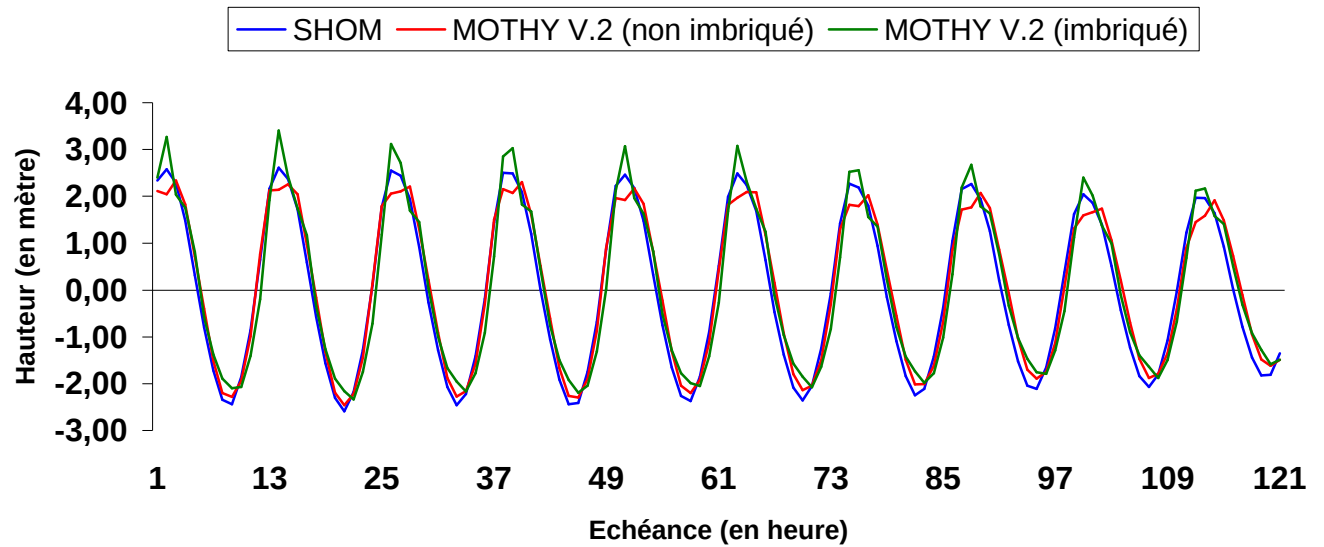


Figure 12.2 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur le domaine CALAIS imbriqué et non imbriqué au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

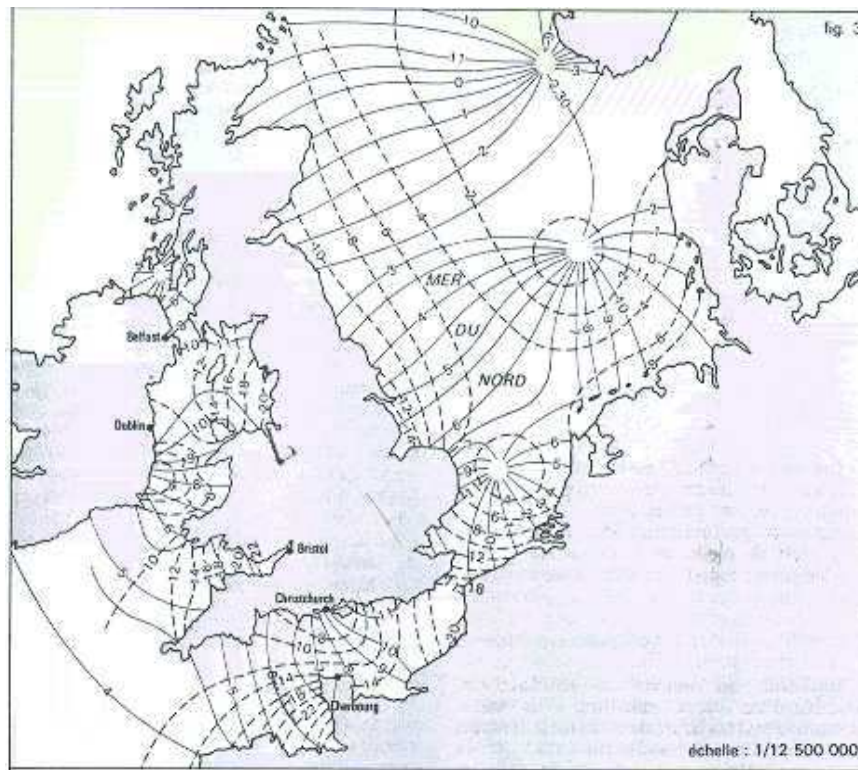


Figure 12.3 : Points amphidromiques en mer du Nord.

12.1.2. Boulogne-sur-Mer

A Boulogne-sur-Mer, le calcul de la marée ne pose pas de problème sur les grands domaines qui se valent d'après les eqm. Les erreurs faibles sur ces domaines sont essentiellement liées à un faible déphasage temporel. Les calculs donnent également de meilleurs résultats sur les domaines imbriqués par rapport aux domaines non imbriqués, car le modèle MOTHY V.2 a tendance à être plus en retard sur les domaines non imbriqués. D'autres erreurs dues à une mauvaise estimation de la hauteur d'eau, plus élevées sur les domaines non imbriqués, sont à prendre en compte. Par exemple, sur le domaine SEINE on voit que sur les deux domaines imbriqués et non imbriqués (cf. figure 12.4), la valeur du déphasage est à peu près la même, cependant sur le domaine non imbriqué, MOTHY V.2 a tendance à surestimer les basses mers. Le biais sur les basses mers est de 0,38 m sur le domaine non imbriqué et de seulement 0,06 m sur le domaine imbriqué.

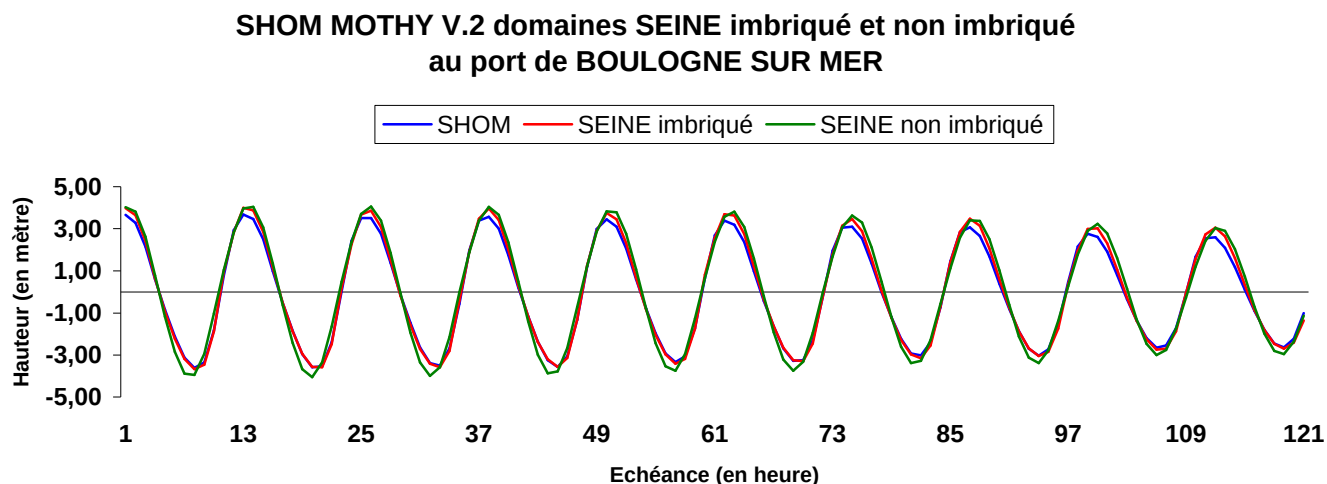


Figure 12.4 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines SEINE imbriqué et non imbriqué au port de Boulogne-sur-mer sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

12.1.3. Le Havre

Les résultats montrent que le calcul de la marée est équivalent sur les trois grands domaines, GAMA restant néanmoins le meilleur. Sur ces trois domaines les erreurs sont faibles, car le déphasage est faible (inférieur à 10 minutes) (cf. tableau 12.2). Concernant les petits domaines, on voit que sur les non imbriqués, le modèle donne de meilleurs résultats que sur le domaine imbriqué. En effet, le déphasage temporel sur le domaine SEINE imbriqué est plus important. MOTHY a tendance à être en retard d'au moins 10 minutes sur le modèle du SHOM, alors que sur SEINE non imbriqué le déphasage temporel est faible (inférieur à 10 minutes) (cf. figure 12.5). Cependant sur le domaine imbriqué, les erreurs sur l'estimation de la hauteur sont moins importantes que sur le domaine non imbriqué. On calcule un biais sur les pleines mers de -0,18 m sur le domaine imbriqué, et de -0,30 m sur le domaine non imbriqué. Les résultats sur les grands domaines sont meilleurs par rapport à ceux des petits domaines car le déphasage temporel est moins élevé, et l'erreur sur l'élévation est également plus faible sur les grands domaines comme nous le montre les courbes sur la figure 12.6.

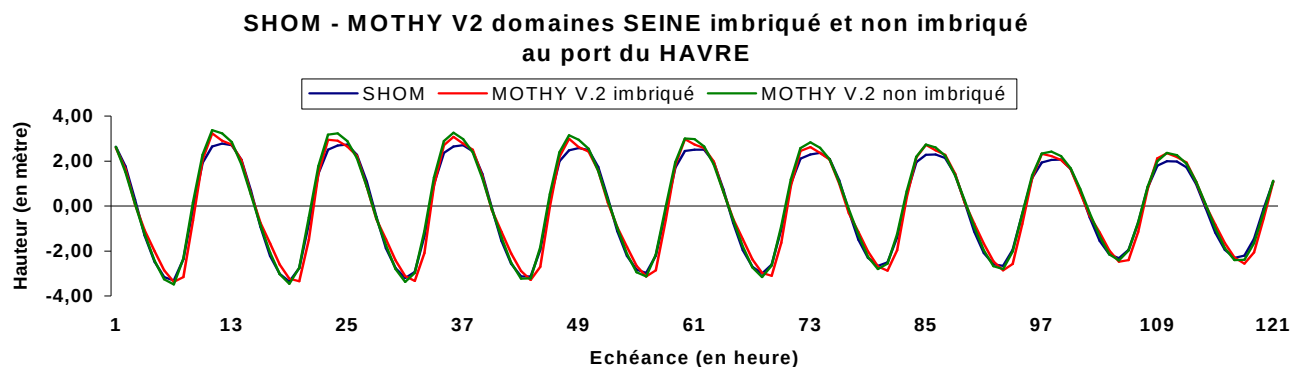


Figure 12.5 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines SEINE imbriqué et non imbriqué au port du Havre sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

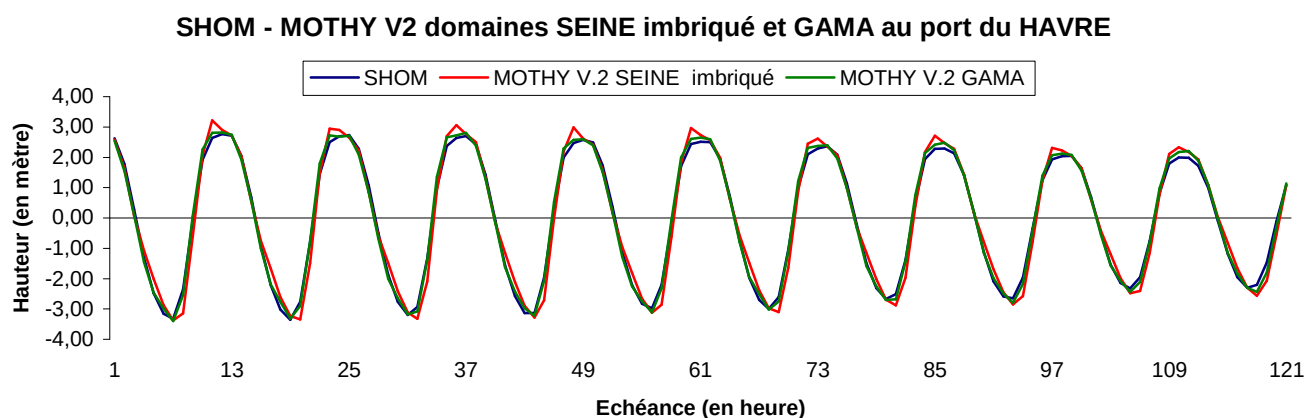


Figure 12.6 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines SEINE imbriqué et GAMA au port du Havre sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

12.1.4. Saint-Malo

Les résultats montrent que le meilleur domaine de calcul est GAMA, et que les domaines GAMAME et ALADIN sont équivalents. Pour les grands domaines, les erreurs sont plus importantes sur les domaines GAMAME et ALADIN, car MOTHY V.2 a tendance à être plus en retard par rapport au domaine GAMA comme le montre la figure 12.6. Le calcul sur les petits domaines est moins bon car le déphasage est plus important que sur les grands domaines comme le montre la figure 12.7. En effet, sur GAMA le modèle est en retard d'au moins 10 minutes, alors que sur COTENTIN non imbriqué le retard est estimé à au moins 20 minutes (cf. tableau 12.2). On observe également que sur les petits domaines, MOTHY V.2 a tendance à davantage surestimer les hautes mers. Les fortes erreurs du modèle peuvent s'expliquer par le fait que la marée est plus importante en ce point avec un marnage de 11 m contre seulement 7 m dans les autres ports et que ce port est situé dans une baie.

SHOM MOTHY V.2 domaines GAMA et GAMAME au port de SAINT-MALO

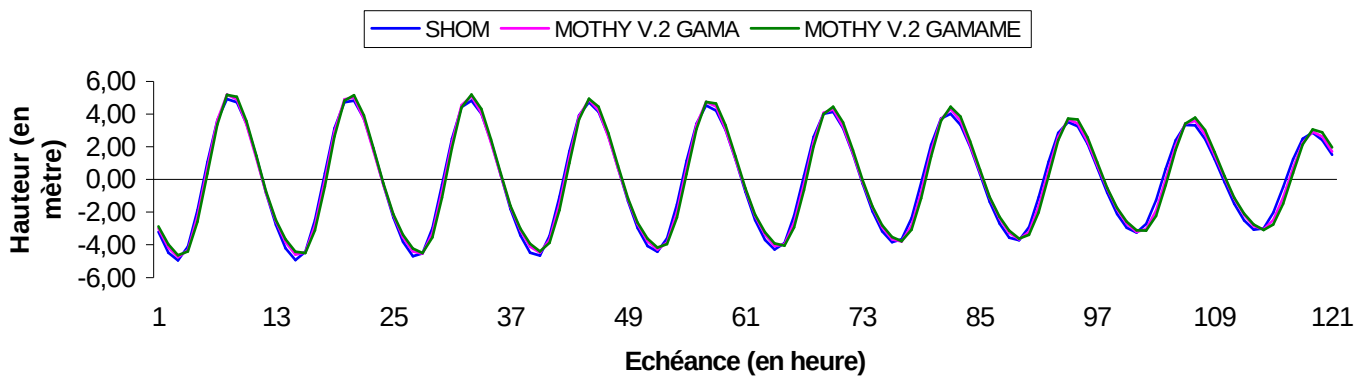


Figure 12.7 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMA et GAMAME au port de Saint-Malo sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

SHOM MOTHY V.2 domaines GAMA et COTENTIN non imbriqué au port de SAINT-MALO

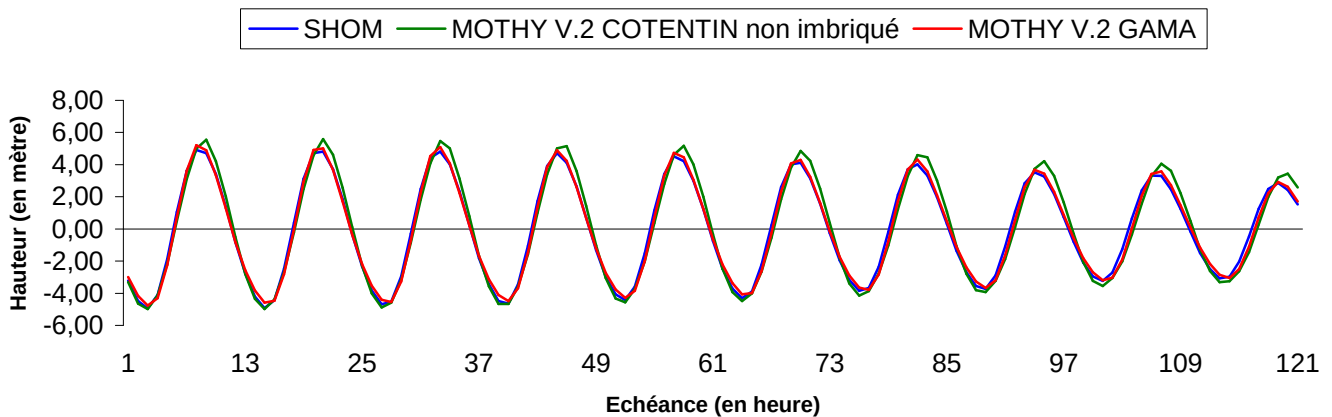


Figure 12.8 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMA et COTENTIN non imbriqué au port de Saint-Malo sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

12.1.5. Brest

A Brest, les résultats montrent que le calcul de la marée est équivalent sur tous les domaines avec une eqm de 0,22 m sur GAMA et IROISE 2, et de 0,18 m sur GAMAME et ALADIN. Les deux meilleurs domaines restent tout de même GAMAME et ALADIN. Pour ce port, les erreurs sont essentiellement liées à un déphasage temporel. En effet, sur le domaine GAMA le modèle a tendance à être en avance d'au moins 20 minutes sur GAMA, d'au moins 10 minutes sur GAMAME et ALADIN, mais il a tendance à être en retard d'au moins 10 minutes sur IROISE 2 (cf. figure 12.9). Cela est dû au maillage qui est différent en fonction des domaines. A Brest le point de calcul est pris plus à l'ouest et plus au sud sur le domaine 5' d'arc (point de grille le plus proche) (cf. figure 12.10 (à droite)), alors que sur le domaine 1' le point de calcul est localisé juste en dessous. (cf. figure 12.10 (à gauche)). L'onde arrive donc plus vite sur le point de mesure du domaine 5' d'arc. De plus elle est retardée sur le domaine 1' d'arc à cause du « Goulet de Brest » qui retarde son déplacement. On observe également, sur la

figure 12.9, que le modèle a tendance à surestimer les pleines mers et les basses mers sur le domaine IROISE 2, le biais sur les pleines mers est de -0,19 m sur IROISE 2 contre seulement -0,04 m sur GAMA, et pour les basses mers le biais vaut -0,29 m sur IROISE 2 et -0,04 m sur GAMA. Cependant, ces faibles erreurs permettent de considérer que le modèle calcule de façon satisfaisante la marée sur ce port. On peut donc conclure que le forçage de la marée sur la bordure ouest est assez bon.

SHOM MOTHY V.2 domaines GAMA et IROISE 2 imbriqué au port de BREST

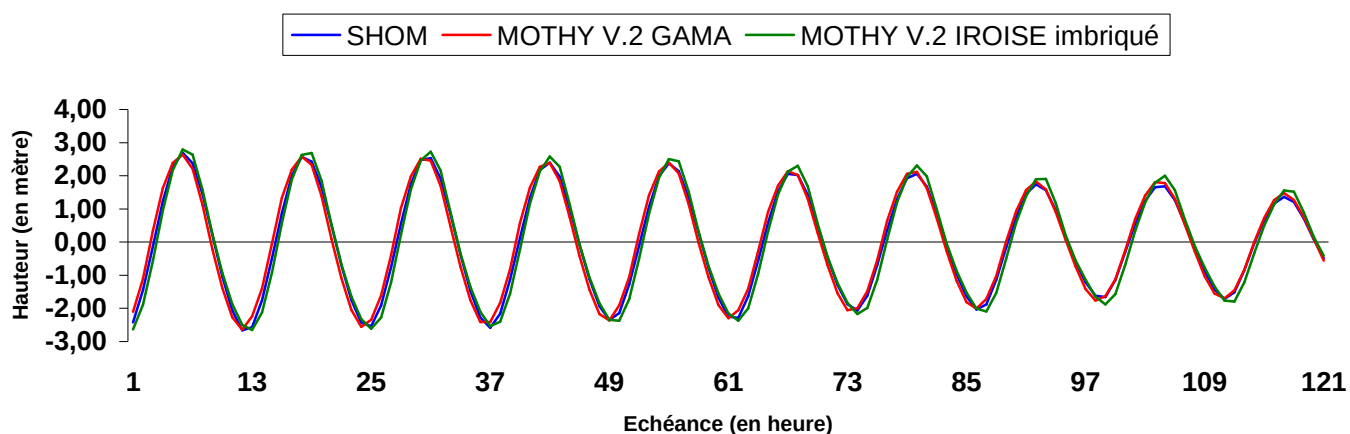


Figure 12.9 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et IROISE imbriqué au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

Remarque

En ce qui concerne les petits domaines, la simulation sur le domaine IROISE 1 non imbriqué a échoué en raison de sa superficie, le domaine étant trop petit.

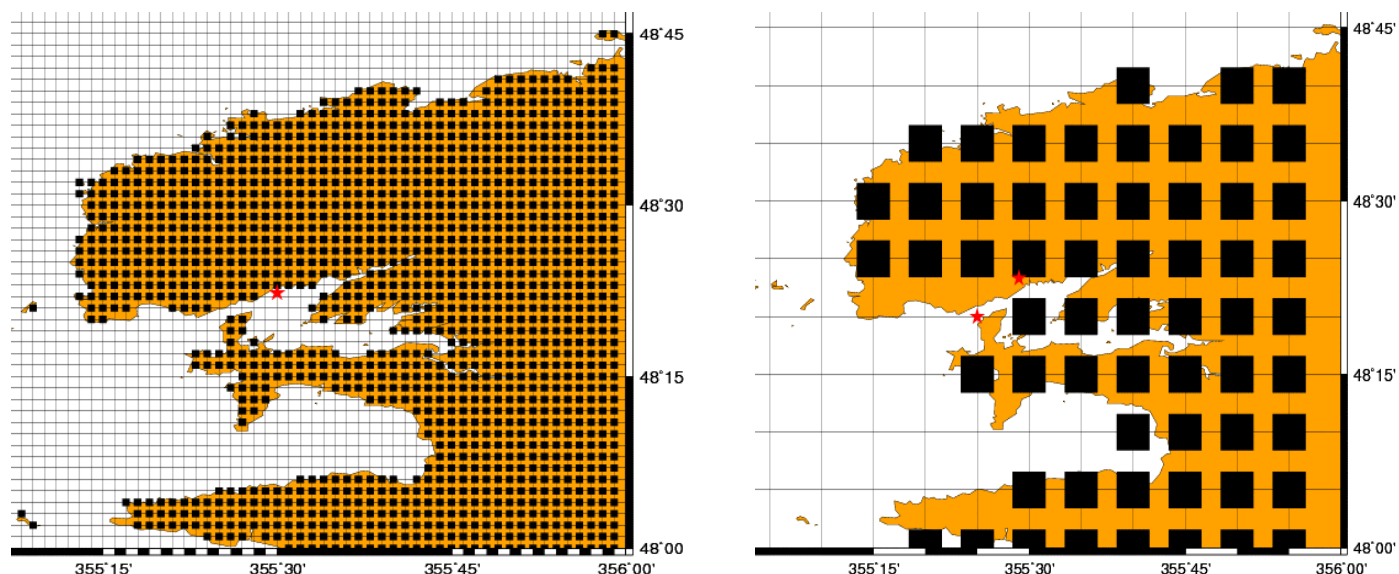


Figure 12.10 : Position du point de calcul sur la grille 1 minute (à gauche) et sur la grille 5 minutes (à droite).

12.1.6. Les Sables d'Olonne

Bien que les calculs donnent de bons résultats sur les cinq domaines au port des Sables d'Olonne, il n'en reste pas moins que GAMA est le meilleur domaine de calcul. Les faibles valeurs des eqm permettent d'avancer que c'est sur ce port que MOTHY V.2 calcule le mieux la marée, et ce quel que soit le domaine. Les erreurs dues au déphasage temporel sont faibles. En effet, sur chaque domaine le déphasage est inférieur à 10 minutes (cf. tableau 12.2). On peut le voir par exemple sur le domaine GAMA (cf. figure 12.11), le décalage entre les courbes est faible. Cependant, on peut observer sur cette même figure une surestimation du modèle des pleines mers (biais égal à -0,24), et une sous-estimation des basses mers (biais égal à -0,18). Aux Sables d'Olonne, les erreurs restent tout de même assez faibles comparées à celles calculées pour les autres ports. On peut donc considérer que le forçage sur le bord ouest du domaine reste bon pour ce port.

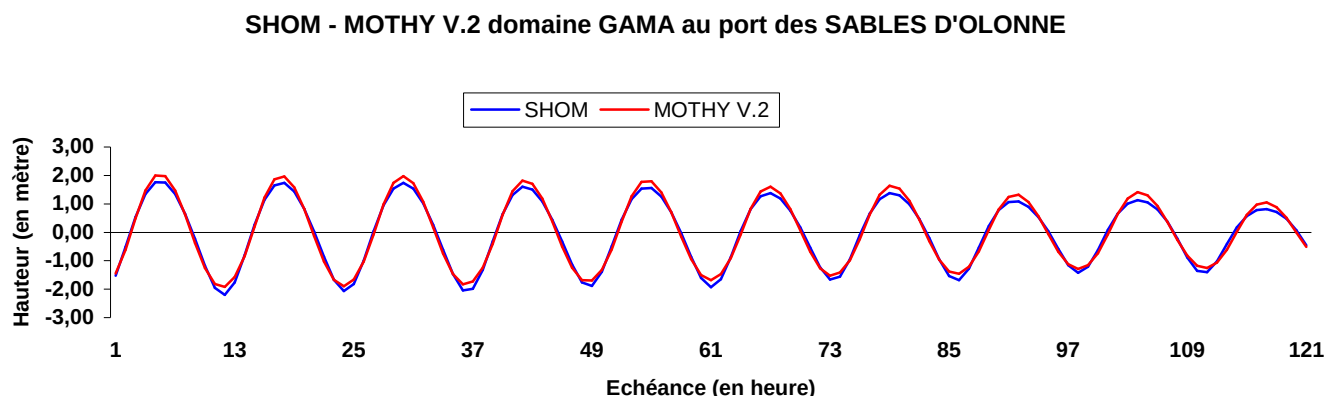


Figure 12.11 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur le domaine GAMA au port des Sables d'Olonne sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

12.2. Bilan

Dans la modélisation de la marée dans MOTHY V.2, la principale erreur est liée à un déphasage temporel plus ou moins important selon la localisation du point de mesure. Mais une autre erreur qu'il ne faut pas négliger est associée à une mauvaise estimation de la hauteur d'eau. Ces erreurs sont en général dues à un problème d'initialisation de la marée sur le bord du domaine, à la définition du domaine de calcul, et à la prise en compte de la bathymétrie dans le calcul. De manière globale, on peut considérer que la meilleure modélisation de la marée dans MOTHY V.2 se fait sur le domaine GAMA. La modélisation sur le domaine ALADIN donnant les mêmes résultats que celle sur le domaine GAMAME, on peut donc utiliser indifféremment les domaines ALADIN et GAMAME. Les faibles erreurs observées aux ports de Brest et Boulogne-sur-Mer permettent de dire que le forçage sur le bord ouest des domaines est bon. Par contre à Dunkerque, les fortes erreurs posent un problème d'initialisation sur le bord nord du domaine lié à la présence de points amphidromiques en mer du Nord (cf. figure 12.3). La modélisation est donc délicate lorsque l'on étend le domaine de calcul plus au nord. En fonction de la localité du point de mesure, le calcul sur les petits domaines peut donner des résultats différents suivant le caractère imbriqué ou non de ces domaines.

13. Comparaison entre les modèles MOTHY V.2 et MOTHY V.1

Afin de valider le nouveau modèle de marée de MOTHY, nous allons dans cette partie comparer les deux versions de ce modèle. Pour cela, nous regroupons les résultats issus des deux modèles dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 13.1) :

DOMAINE	DUNKERQUE		BOULOGNE		LE HAVRE		SAINT MALO		BREST		SABLES D'OLONNE	
	V.1	V.2	V.1	V.2	V.1	V.2	V.1	V.2	V.1	V.2	V.1	V.2
GAMA	0,42	0,29	0,21	0,20	0,20	0,15	0,31	0,27	0,25	0,22	0,12	0,14
GAMAME	0,31	0,63	0,22	0,19	0,17	0,18	0,31	0,46	0,22	0,18	0,12	0,16
CALAIS IMBRIQUE	0,63	0,44	0,49	0,32								
CALAIS NON IMBRIQUE		0,35		0,37								
MPDC		0,42		0,34		0,20						
SEINE IMBRIQUE			0,49	0,20	0,40	0,32						
SEINE NON IMBRIQUE				0,45		0,24						
COTENTIN IMBRIQUE							1,07	0,55				
COTENTIN NON IMBRIQUE								0,60				
MICHEL IMBRIQUE							0,84	0,55				
MICHEL NON IMBRIQUE								0,60				
IROISE IMBRIQUE (1)								1,08				
IROISE IMBRIQUE (2)									0,22			
YEU NON IMBRIQUE												0,19
YEU IMBRIQUE											0,12	0,15
ALADIN		0,64		0,19		0,18		0,46		0,18		0,16

Tableau 13.1 : Erreurs quadratiques moyennes (en m) sur les six ports sur différents domaines entre le modèle du SHOM et les deux modèles MOTHY sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

13.1. Analyse

Globalement sur le domaine GAMA, la nouvelle version de MOTHY donne de meilleurs résultats par rapport à l'ancienne version. En effet, les erreurs de déphasage sont moins importantes dans MOTHY V.2, la modélisation de la marée y est donc meilleure sur ce domaine. On peut l'observer en comparant par exemple, les hauteurs d'eau issues de MOTHY V.1 à celles de MOTHY V.2 sur la figure 13.1. On voit bien que MOTHY V.1 est plus en retard par rapport à MOTHY V.2.

SHOM - MOTHY V.1 domaine GAMA au port de DUNKERQUE

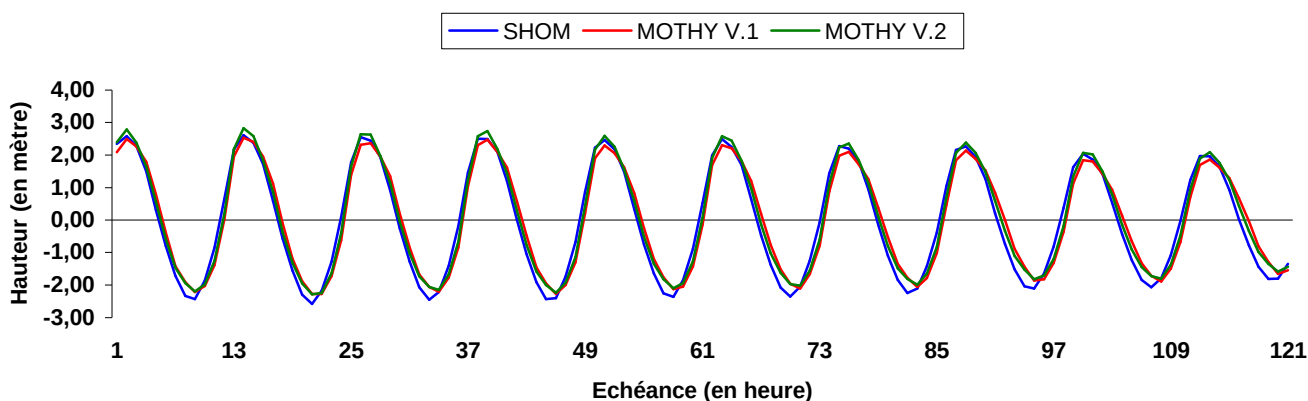


Figure 13.1 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine GAMA au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

Les résultats montrent également que le calcul de la marée sur les petits domaines est meilleur dans la MOTHY V.2. Dans les deux versions, les principales erreurs sont liées à un problème de déphasage temporel et à une mauvaise estimation de la hauteur d'eau. Cependant, dans le nouveau modèle il y a une meilleure correction de ce déphasage et de cette erreur d'amplitude. On peut le voir sur deux exemples. Tout d'abord, en comparant les deux versions à Saint-Malo sur le domaine COTENTIN imbriqué (cf. figure 13.2), on constate que MOTHY V.1 est plus en retard que MOTHY V.2.

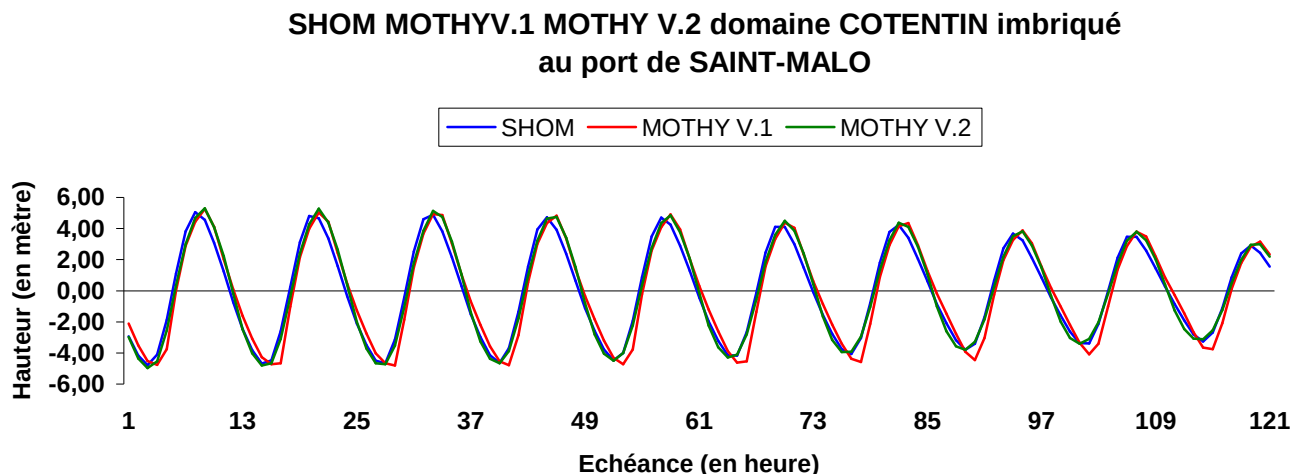


Figure 13.2 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine COTENTIN imbriqué au port de Saint-Malo sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

Puis en les comparant à Boulogne-sur-Mer sur le domaine SEINE imbriqué (cf. figure 13.3), on voit que les erreurs sont essentiellement dues à un problème d'estimation de la hauteur d'eau. En effet, les erreurs sur les pleines mers et les basses mers sont plus grandes avec l'ancienne version : biais de -0,87 m contre seulement 0,06 m avec MOTHY V.2 sur les basses mers.

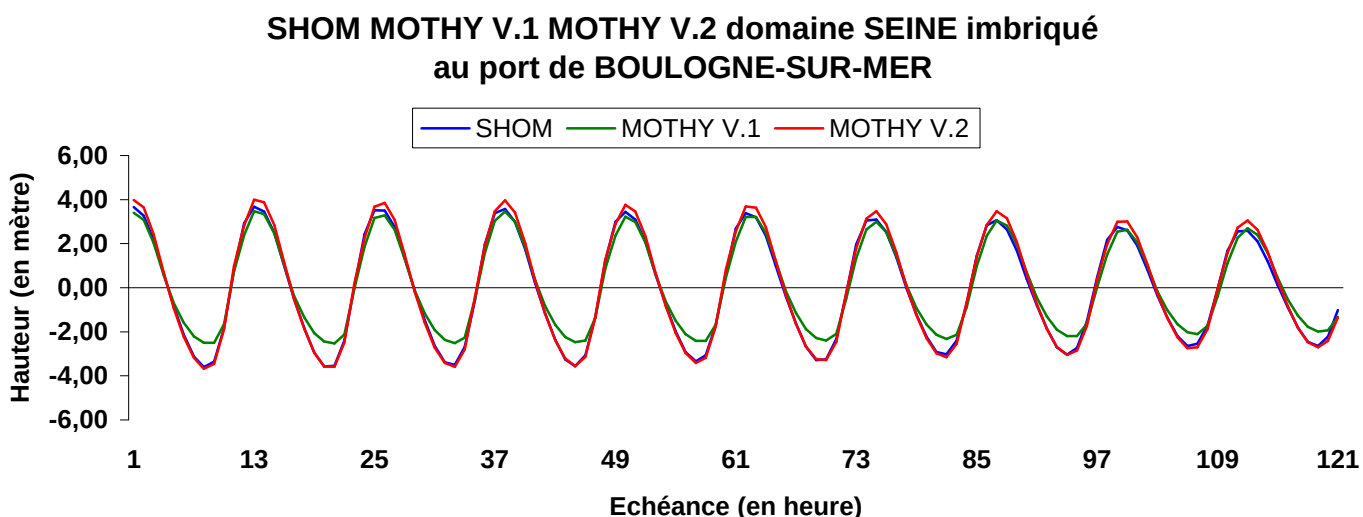


Figure 13.3 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine SEINE au port de Boulogne-sur-Mer sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

A Dunkerque et Saint-Malo, le nouveau modèle est moins performant sur le domaine GAMAME par rapport à l'ancienne version. En effet, dans ces deux cas, on observe un déphasage plus important avec MOTHY V.2. On peut le voir par exemple pour Dunkerque (cf. figure 13.4).

SHOM - MOTHY V.1 domaine GAMAME au port de DUNKERQUE

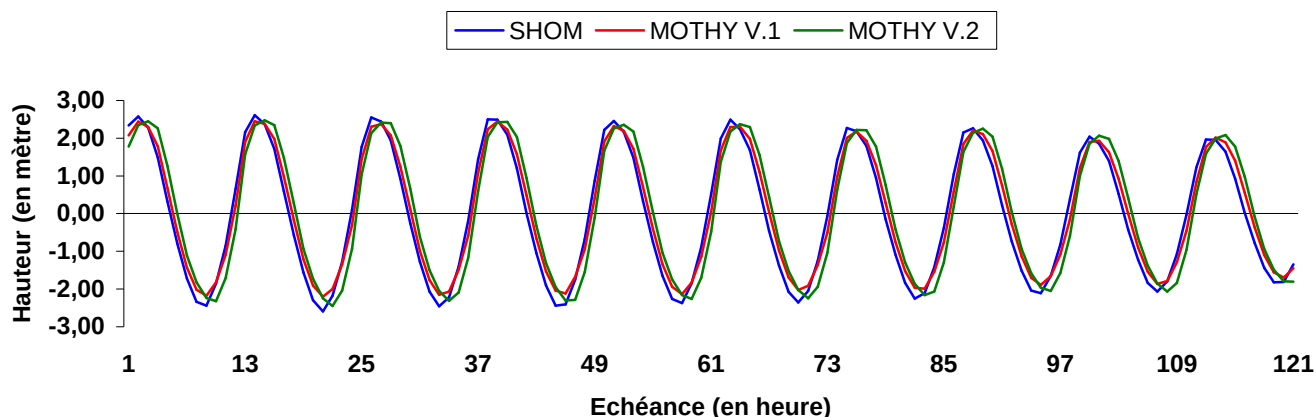


Figure 13.4 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine GAMAME au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

13.2. Bilan

De manière globale, le calcul de la marée dans la nouvelle version apporte de meilleurs résultats que la première. Les erreurs liées au déphasage temporel, et à la mauvaise estimation de la hauteur d'eau sont atténuées dans MOTHY V.2. La modélisation sur les petits domaines dans MOTHY V.2 semble également meilleure. Cela est lié au forçage de la marée qui est différent dans les deux modèles. Le forçage à partir des données du LEGOS paraît meilleur que celui fait à partir des marégraphes. Il est certain que la nouvelle version est plus performante, cependant il reste toujours un problème de modélisation sur la bordure nord qu'il faudrait améliorer dans les prochaines versions.

14. Etude du calcul de la marée pour les points en mer

La marée au large des côtes est elle aussi un facteur important lorsqu'il s'agit de prévoir la dérive de nappes de carburants. En effet le plus souvent les dégazages sauvages et les naufrages ont lieu en haute mer. Le SHOM ne possédant pas de données de hauteur d'eau pour les points en mer, il ne sera pas possible de faire une analyse similaire à celle effectuée sur les ports. Pour ces points, nous ferons exclusivement une comparaison entre MOTHY V.1 et MOTHY V.2. Ceci permettra de mettre en évidence une différence de comportement, mais on ne pourra pas apprécier la précision de MOTHY V.2. Il faudrait pour cela comparer les données de MOTHY V.2 avec des valeurs observées. Le premier point étudié se trouve au large du littoral calaisien, le second à plusieurs kilomètres du cap de la Hague, et enfin le troisième se situe aux alentours de la pointe bretonne dans la mer d'Iroise. Selon le point de mesure, nous choisissons comme données de référence les valeurs de hauteur d'eau calculées à l'aide de la première version, soit sur le domaine GAMAME, soit sur le domaine GAMA.

14.1. Pas de Calais

Pour ce point les valeurs de référence choisies sont celles obtenues par MOTHY V.1 sur le domaine GAMAME. Ce choix a été motivé par les bons résultats issues de cette configuration pour Dunkerque, qui est le port le plus proche du point étudié. Les différences de hauteur d'eau entre MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sont comme le montre la figure 14.1 dues à un déphasage temporel. L'étude sur les basses mers et les pleines mers montre qu'à ce déphasage s'ajoute une mauvaise estimation des hauteurs d'eau. Les valeurs obtenues sur le domaine MPDC se rapprochent davantage de celle calculées avec MOTHY V.1. En revanche les valeurs calculées sur le domaine CALAIS imbriqué, sont plus éloignées des valeurs de référence que celles établies sur le domaine non imbriqué. On peut également noter que les hauteurs calculées sur les domaines GAMAME et ALADIN avec la seconde version de MOTHY sont très proches.

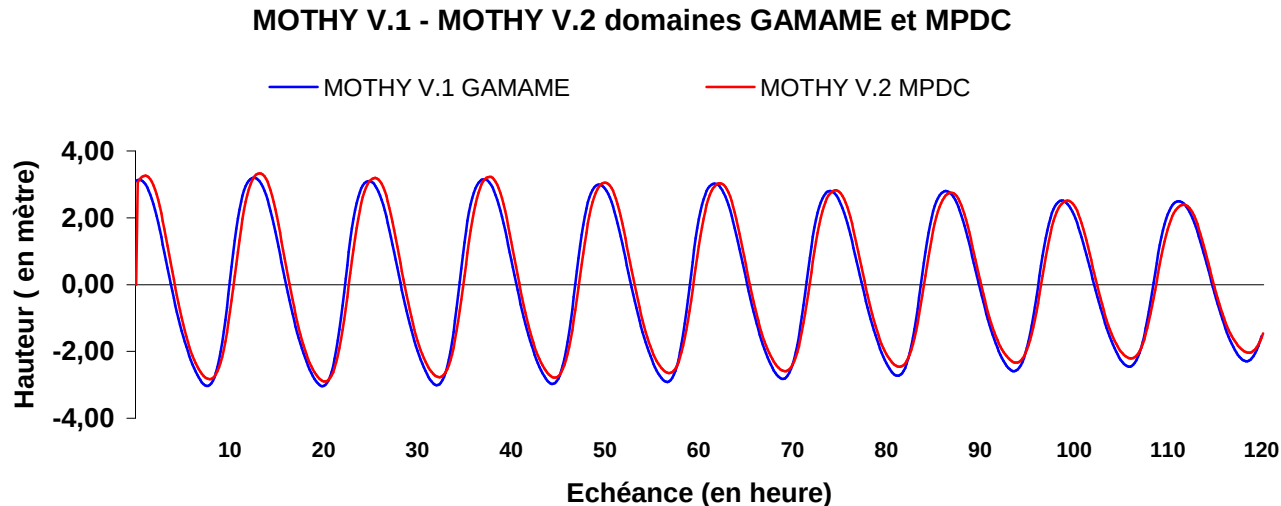


Figure 14.1 : Hauteurs d'eau (en m) sur les domaines GAMA, GAMAME et MPDC avec MOTHY V.1 et MOTHY V.2 au point « Pas de Calais » sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

14.2. La Hague

Les données de référence pour ce point sont celles calculées par le modèle MOTHY V.1 sur le domaine GAMA. C'est sur domaine que les résultats sont les meilleurs pour Saint-Malo, point côtier le plus proche de notre point de mesure. On note que les hauteurs d'eau calculées en ce point convergent plus vers les hauteurs de référence que pour le point « Pas de Calais ». De manière générale, on note l'existence d'un déphasage entre l'onde marée calculée avec MOTHY V.1 et celle évaluée avec MOTHY V.2, ce déphasage est illustré par la figure 14.2. On peut également voir sur cette figure, en s'attachant particulièrement aux pleines mers et aux basses mers, des estimations de hauteur d'eau différentes pour les deux modèles. Les hauteurs d'eau déterminées sur les grands et les petits domaines imbriqués sont équivalents. Les valeurs estimées sur les domaines non imbriqués sont voisines de celles de référence contrairement à celles établies sur les domaines imbriqués. Comme pour le point précédent, les calculs effectués sur les domaines GAMAME et ALADIN se rejoignent.

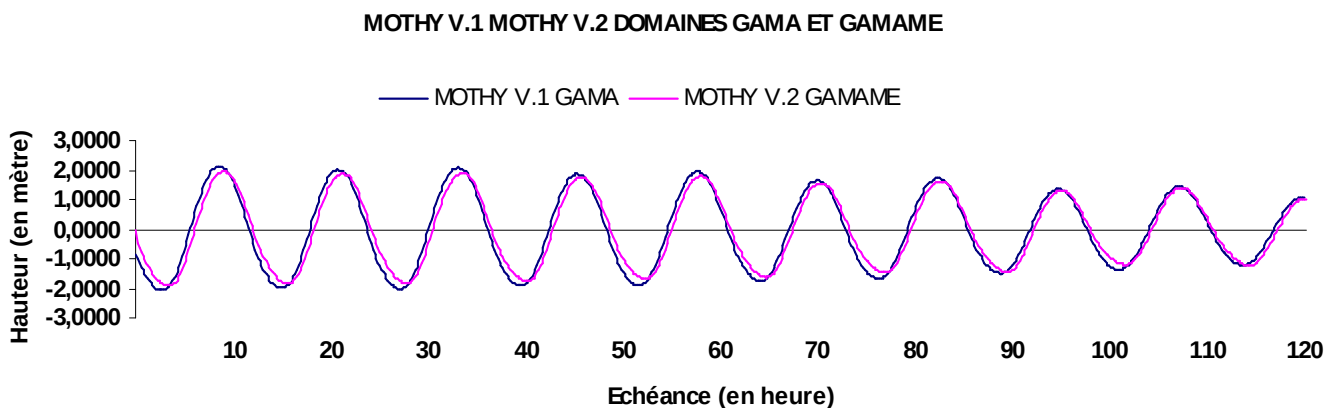


Figure 14.2 : Hauteurs d'eau (m) issues des modèles MOTHY V.1 et MOTHY V.2, au point de « La Hague » respectivement sur les domaines GAMA et GAMAME sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.

14.3. Iroise

Pour ce point ceux sont les hauteurs d'eau calculées avec MOTHY V.1 sur le domaine GAMA qui nous servent de référence. L'étude sur ce point permet de confirmer que les domaines GAMAME et ALADIN peuvent se substituer l'un à l'autre. Les valeurs déterminées sur les grands domaines sont assez proches de valeurs estimées avec MOTHY V.1. En revanche celles obtenues sur le domaine IROISE 2 tendent à s'en éloigner davantage.

14.4. Bilan

Pour les points en mer, c'est au point « Pas de Calais » que les modèles ont les comportements les plus divergents. Pour l'ensemble des points les écarts constatés s'expliquent par un déphasage temporel et une différence plus ou moins importante dans la détermination des hauteurs d'eau. Les différences majeures entre les valeurs calculées sur les domaines imbriqués et non imbriqués proviennent en toute logique des causes exposées précédemment mais également par le domaine d'imbrication. Les analyses sur ces points montrent toutes un comportement quasi identique du modèle sur les domaines GAMAME et ALADIN.

15. Etude partielle sur la dérive

Les paragraphes précédents ont concerné le calcul de la marée. L'étude sur ce calcul a permis de mettre en évidence les domaines sur lesquels l'évaluation de la hauteur d'eau est optimale. L'analyse de la dérive constitue un travail complémentaire dans l'étude du comportement de la seconde version de MOTHY. C'est dans cet objectif qu'intervient l'analyse qui suit. Il convient cependant de clarifier la méthode utilisée pour faire cette analyse. Dans les paragraphes qui suivent, nous comparons la distance parcourue par la goutte déterminée par MOTHY V.1, sur un domaine de référence choisi arbitrairement, avec les distances calculées par MOTHY V.2 sur des domaines de résolutions différentes. Ceci permettra d'identifier le ou les domaines sur lesquels la dérive se rapproche davantage de celle obtenue par MOTHY V.1. En revanche il ne sera pas possible de conclure sur la supériorité de précision des modèles.

15.1. Méthode de calcul

Afin de faciliter le calcul des distances, on considère que la position de la goutte varie peu en longitude et en latitude. Ainsi à 50°N on peut supposer qu'un degré de latitude équivaut à 111 km et un degré de longitude à 71 km. La distance est donc donnée par l'équation suivante:

$$\text{Distance} = \sqrt{(\Delta \text{long} \times 71)^2 + (\Delta \text{lat} \times 111)^2}$$

15.2. Lâcher n°1

Le premier lâcher est effectué sur le domaine CALAIS à 50°N et 1°E. Pour comprendre le comportement du modèle MOTHY V.2 sur ce domaine ainsi que sur les grands domaines, nous comparons les distances parcourues. Avec MOTHY V.2, on note que la goutte parcourt des distances plus faibles : 135 km sur le domaine GAMAME avec MOTHY V.1 contre 80,4 km pour ce même domaine avec MOTHY V.2, soit 60% de la distance de la goutte établie par la première version. MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et ALADIN calcule des distances du même ordre.

Sur les petits domaines la distance parcourue est encore réduite avec environ 60 km ou encore 44% du parcours de référence.

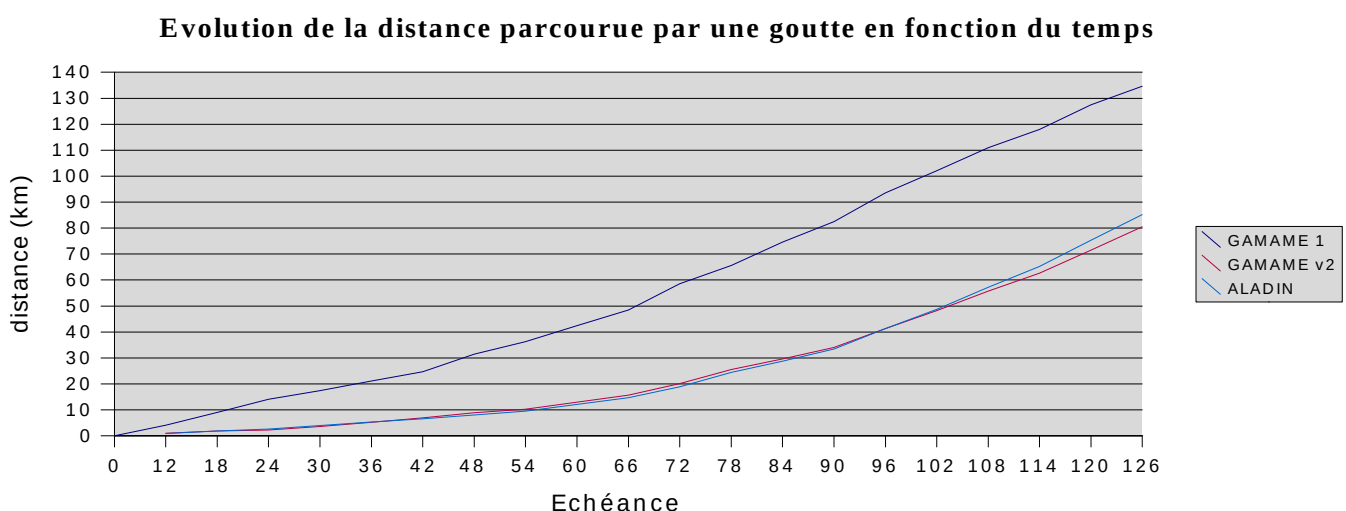
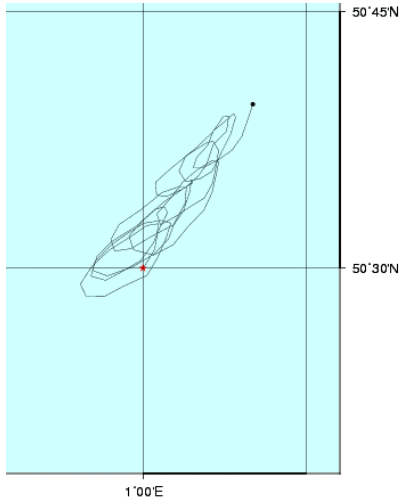
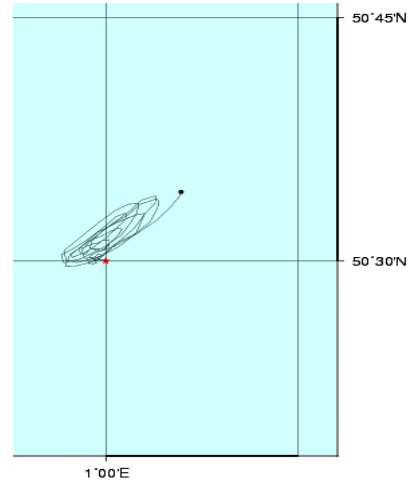


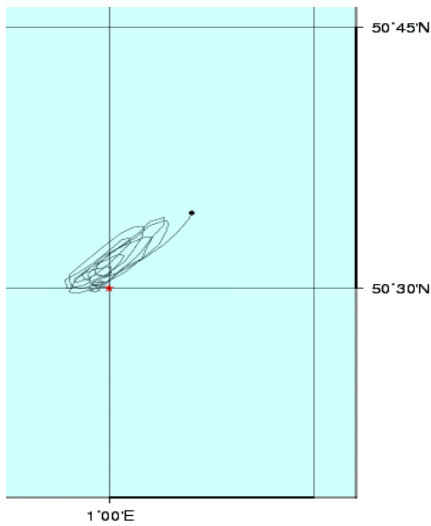
Figure 15.1: distance parcourue par une goutte lâchée du 50°N et 1°E, calculée avec MOTHY V.1 sur le domaine GAMAME et MOTHY V.2 sur le domaines GAMAME et ALADIN.



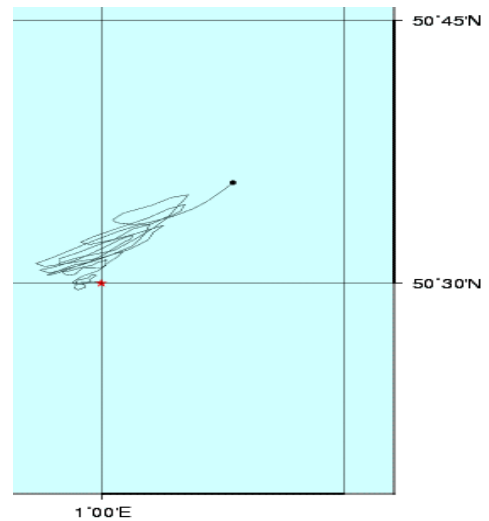
**Domaine GAMAME
Version 1**
Distance parcourue: 135 km



**Domaine :ALADIN
Version 2**
Distance parcourue : 80,4 km.



**Domaine GAMAME
Version 2**
Distance parcourue: 80,4 km



**Domaine :CALAIS
Version 2 non imbriqué**
Distance parcourue : 60 km.

Figure 15.2 : Trajectoire d'une goutte lâchée au point 50°N et 1°E sur différents domaines avec les deux versions de MOTHY.

15.3. Lâcher n°2

Le deuxième lâcher est situé plus à l'ouest, 3°W et 50°N. Les valeurs de référence pour ce point sont celles calculées sur le domaine GAMA avec la première version de MOTHY. Là encore on constate que la distance parcourue par la goutte est moins importante avec la seconde version de MOTHY : 186 km avec MOTHY V.1 sur GAMA contre 108 km, soit 58% de la distance de référence, sur GAMAME et ALADIN avec MOTHY V.2. Contrairement, à ce qui a été remarqué pour le lâcher n°1, les petits domaines estiment des distances qui s'accordent davantage avec celle déterminée sur le domaine GAMA par la première version. Pour le domaine COTENTIN imbriqué le parcours total s'élève à 119 km (64% de la distance de référence), et pour ce même domaine en configuration non imbriquée la goutte parcourt 108 km comme sur les grands domaines.

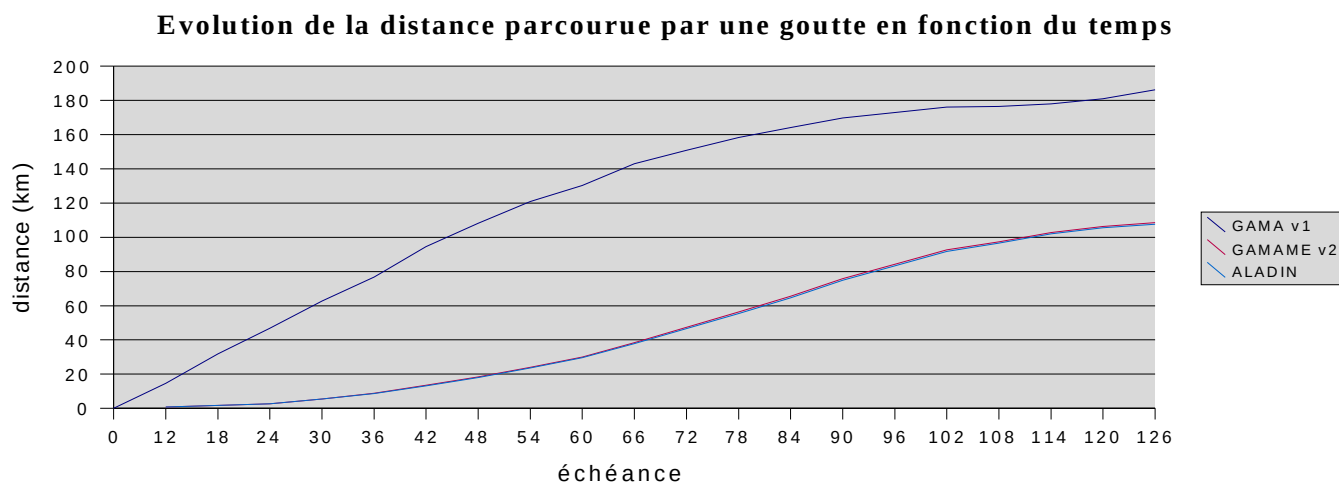
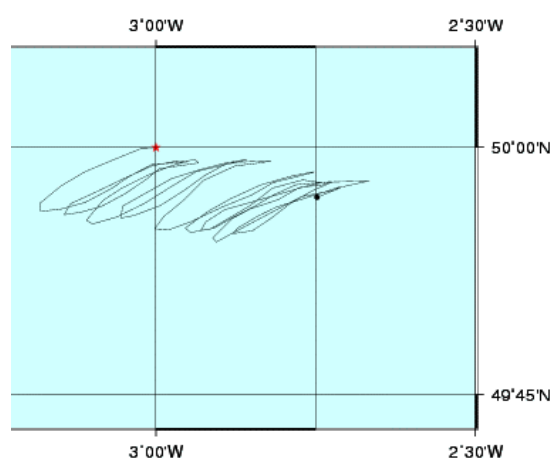
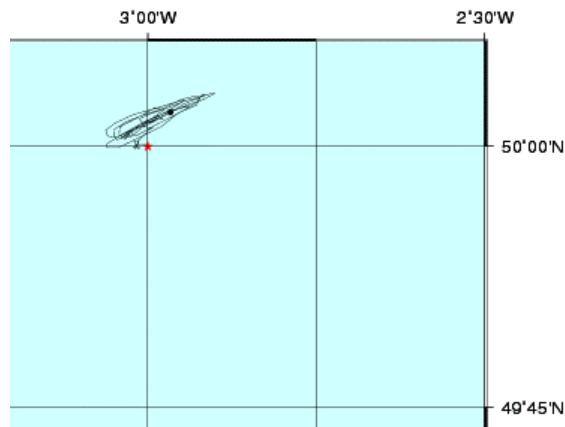


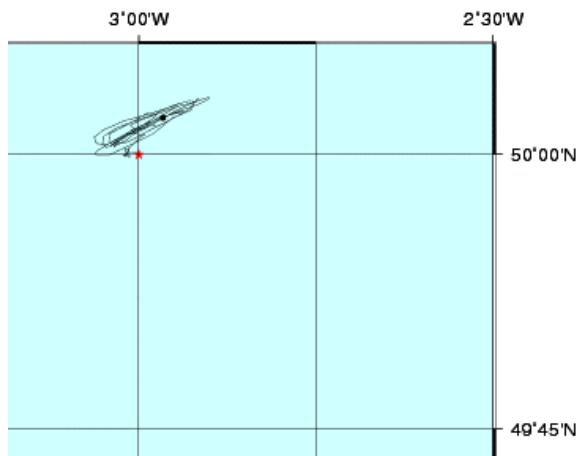
Figure 15.3: distance parcourue par une goutte lâchée du 50°N et 3°W, calculée avec MOTHY V.1 sur le domaine GAMAME et MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et ALADIN.



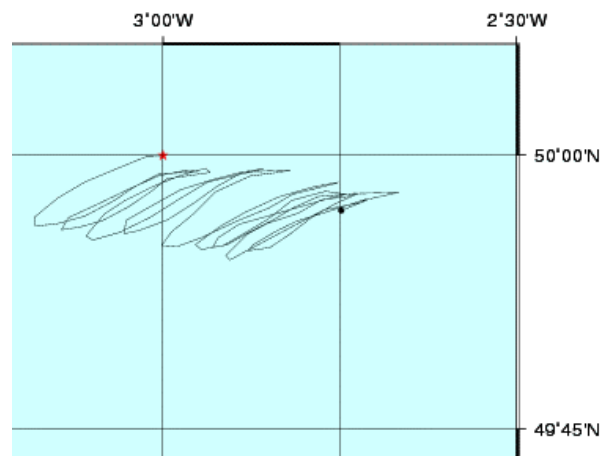
**Domaine GAMA
Version 1
Distance parcourue: 186 km**



**Domaine :ALADIN
Version 2
Distance parcourue : 108 km**



Domaine GAMAME
Version 1
Distance parcourue: 108 km



Domaine :COTENTIN
Version imbriqué
Distance parcourue : 119 km.

Figure 15.4 : Trajectoire d'une goutte lâchée au point 50°N et 1°E sur différents domaines avec les deux versions de MOTHY.

15.4. Bilan

L'étude partielle sur la dérive montre des différences entre les deux versions du modèle MOTHY. En effet les distances parcourues avec MOTHY V.2 sont largement inférieures à celles calculées avec MOTHY V.1, la goutte tendant à rester près du point de lâcher.

Synthèse générale

Cette nouvelle version est intéressante au sens où on pourra dorénavant travailler sur des domaines de calcul que l'on pourra définir suivant l'étude demandée. L'étude montre que le forçage sur le bord ouest est assez satisfaisant. Par rapport à la première version de MOTHY, la modélisation de la marée sur les petits domaines dans la nouvelle version est meilleure. En effet, le déphasage temporel est moins important et l'estimation de la hauteur d'eau est meilleure. La différence du forçage au bord des domaines permet d'expliquer cette atténuation des erreurs. Le forçage avec les marégraphes semble donc moins bon que le forçage avec les données du LEGOS. MOTHY dans sa nouvelle version est également intéressant du fait que l'on peut s'affranchir d'utiliser le domaine GAMAME, et préférer le domaine ALADIN, les deux domaines apportant les mêmes résultats. Dans l'ensemble l'étude est concluante. Nous avons montré que globalement le calcul de la marée dans la nouvelle version est mieux pris en compte. Cependant à Dunkerque et à Saint-Malo, nous avons noté que le déphasage temporel est plus important, et que l'estimation de la hauteur d'eau n'est pas satisfaisante. Il serait donc intéressant de se focaliser sur ces points, et de voir pourquoi le modèle génère plus d'erreurs en ces deux points de mesure. A Dunkerque, on peut l'expliquer par le fait que le point est situé près de la mer du Nord, et que des points amphidromiques y sont localisés. Pour Saint-Malo l'explication peut venir du fait que le port est localisé dans une baie et que la marée y est plus importante (environ 11 m de marnage). Mais cela reste des hypothèses à confirmer. Les études comparatives entre la première et la seconde version du modèle, pour les points en mer et la dérive confirment la complexité de la modélisation de la marée et de la dérive dans la Manche. Ces études confirment également la similarité de comportement de MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et ALADIN.

Conclusion

Le but de cette étude a été d'apprécier la bonne prise en compte du calcul de la marée dans la nouvelle version de MOTHY, de déterminer les domaines pour lesquels l'estimation de la hauteur d'eau avec la cette version est optimale, et accessoirement de voir sur quels domaines ce modèle est plus précis que MOTHY V.1. La seconde version de MOTHY présente un avantage majeur sur la première version : le choix du domaine. En effet cette nouvelle version permettra de travailler sur des domaines de calcul ayant une résolution différente de celle de MOTHY. Cette étude préliminaire sur MOTHY V.2 montre de plus, qu'en majorité, ce modèle estime mieux les hauteurs d'eau que son prédécesseur. L'analyse effectuée sur l'évaluation de cette hauteur d'eau montre que les principales sources d'erreurs sont le déphasage temporel entre l'onde marée modélisée et l'onde de référence, ainsi que la mauvaise estimation des hauteurs d'eau. Quant à la modélisation de la dérive, on ne peut que constater des écarts importants entre les modèles sur les distances parcourues.

Il serait intéressant pour approfondir cette étude d'examiner plus en détail le comportement du modèle sur les petits domaines, et de comprendre pourquoi dans certains cas, le calcul sur les domaines imbriqués donnent de meilleurs résultats et dans d'autres, la modélisation est meilleure sur les domaines non imbriqués. Il faudrait également changer le temps de simulation et multiplier les points de mesure afin de faire ressortir d'autres comportements du modèle non mis en évidence ici. Une étude complémentaire sur les courants et la dérive, première fonction du modèle, apporterait sûrement des éléments décisifs à notre analyse.

Bibliographie

Les ouvrages :

- [1] **Dars M., Bessero G. et Guevel D.**, 1979 : Les marées, Tome I.
- [2] SHOM, 1997 : La marée. (Les guides du SHOM).

Les documents :

- [3] **Daniel P.**, 2004 : Document technique MOTHY.
- [4] **DPREVI-Mar/**: Notices d'utilisation du modèle MOTHY, version 07 .
- [5] **Daniel P.**, 2003 : Notes de cours sur les marées (IENM2).
- [6] **Regimbeau M.**, 25 juin 2003 : Simulation de la marée globale dans le Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures (MOTHY). Rapports de stage de fin d'étude n° 874, ENM.
- [7] **Billon C., Le Henaff A., Marty F. et Robres J-H.**, 2001 : Les courants de marée dans MOTHY. Rapports de projet de modélisation, ENM.

Les sites :

- [8] Site internet du SHOM .
<http://www.shom.fr>
- [9] Site internet de la pollution marine.
<http://www.meteorologie.eu.org/mothy>
- [10] Site intramet de la Dprevi/Mar.
<http://glenan>
- [11] Site internet du modèle TELEMAC 2D.
<http://www.telemacsystem.com>
- [12] Site internet dédié à l'altimétrie et l'orbitographie.
http://www.aviso.oceanobs.com/html/swt/yp/lefevre_uk.html
- [13] Site internet de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'hydraulique et des Télécommunications.
<http://www.enseiht.fr>

Listes des figures

Figure 2.1 : Courbe de marée pendant 24 heures : figure tirée de l'ouvrage « La marée. » (SHOM, 1997 [2]).	11
Figure 2.2 : Courbes des différents types de marée pendant une lunaison : figure tirée de l'ouvrage « La marée. » (SHOM, 1997 [2]).	12
Figure 2.3 : Force génératrice de la marée (à gauche) et répartition de la force génératrice (à droite), figures tirées de l'ouvrage « La marée. » (SHOM, 1997 [2]).	12
Figure 2.4 : Nouvelle Lune (à gauche) et pleine Lune (à droite).	13
Figure 2.5 : Premier quartier (à gauche) et dernier quartier (à droite).	13
Figure 3.1 : Exemple de grilles du modèle MOTHY : grille 5 minutes d'arc à gauche et grille 1 minute d'arc à droite.	14
Figure 3.2 : Schéma d'ensemble des modèles de dérive de polluant.	16
Figure 3.3 : Extrait du maillage de TELEMAC 2D pour le modèle « Nord-Bretagne ».	17
Figure 4.1 : Domaine golfe de Gascogne-Manche-mer du Nord (à gauche) et domaine golfe de Gascogne-Manche et les petits domaines (à droite).	18
Figure 5.1 : Carte donnant la position des ports et des points en mer sur le domaine GAMA.	19
Figure 6.1 : Exemple de ligne d'un fichier résultat.	21
Figure 11.1 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles du SHOM et MOTHY V.1 sur le domaine IROISE 1 à Brest sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	25
Figure 11.2 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles du SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMA et GAMAME à Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	25
Figure 12.1 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur le domaine GAMAME au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	27
Figure 12.2 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur le domaine CALAIS imbriqué et non imbriqué au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	28
Figure 12.3 : Points amphidromiques en mer du Nord.	28
Figure 12.4 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines SEINE imbriqué et non imbriqué au port de Boulogne-sur-mer sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	29
Figure 12.5 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines SEINE imbriqué et non imbriqué au port du Havre sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	30
Figure 12.6 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines SEINE imbriqué et GAMA au port du Havre sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	30
Figure 12.7 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMA et GAMAME au port de Saint-Malo sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	31
Figure 12.8 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMA et COTENTIN non imbriqué au port de Saint-Malo sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	31
Figure 12.9 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et IROISE imbriqué au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	32
Figure 12.10 : Position du point de calcul sur la grille 1 minute (à gauche) et sur la grille 5 minutes (à droite).	32
Figure 12.11 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM et MOTHY V.2 sur le domaine GAMA au port des Sables d'Olonne sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	33

Figure 13.1 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine GAMA au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	34
Figure 13.2 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine COTENTIN imbriqué au port de Saint-Malo sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	35
Figure 13.3 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine SEINE au port de Boulogne-sur-Mer sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	35
Figure 13.4 : Hauteurs d'eau (en m) issues des modèles SHOM, MOTHY V.1 et MOTHY V.2 sur le domaine GAMAME au port de Dunkerque sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	36
Figure 14.1 : Hauteurs d'eau (en m) sur les domaines GAMA, GAMAME et MPDC avec MOTHY V.1 et MOTHY V.2 au point « Pas de Calais » sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	37
Figure 14.2 : Hauteurs d'eau (m) issues des modèles MOTHY V.1 et MOTHY V.2, au point de « La Hague » respectivement sur les domaines GAMA et GAMAME sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	38
Figure 15.1: distance parcourue par une goutte lâchée du 50°N et 1°E, calculée avec MOTHY V.1 sur le domaine GAMAME et MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et ALADIN.	39
Figure 15.2 : Trajectoire d'une goutte lâchée au point 50°N et 1°E sur différents domaines avec les deux versions de MOTHY.	40
Figure 15.3: distance parcourue par une goutte lâchée du 50°N et 3°W, calculée avec MOTHY V.1 sur le domaine GAMAME et MOTHY V.2 sur les domaines GAMAME et ALADIN.	41
Figure 15.4 : Trajectoire d'une goutte lâchée au point 50°N et 1°E sur différents domaines avec les deux versions de MOTHY.	42
Figure I.1 : Carte donnant la position des 13 marégraphes sur le domaine GAMA.	56
Figure I.2 : Carte donnant les points sur les bords ouest et nord où est effectué le forçage de la marée dans la nouvelle version de MOTHY (points tous les 0,25°).	56
Figure II.1 : Domaine ALADIN (à gauche) et domaine COTENTIN (à droite).	57
Figure II.2 : Domaine SEINE (à gauche) et domaine MPDC (à droite).	58
Figure II.3 : Domaine CALAIS (à gauche) et domaine YEU (à droite).	58
Figure II.4 : Domaine MICHEL (à gauche) et domaine IROISE 1 (à droite).	59
Figure II.5 : Domaine IROISE 2 étendu.	59

Listes des tableaux

Tableau 11.1 : Erreurs quadratiques moyennes (en m) pour les six ports sur différents domaines entre le modèle du SHOM et MOTHY V.1 sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	24
Tableau 12.1 : Erreurs quadratiques moyennes (en m) (avant et après re-phasage) pour les six ports, sur différents domaines entre le modèle du SHOM et MOTHY V.2 sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	26
Tableau 12.2 : Durée de déphasage du modèle MOTHY V.2 par rapport au SHOM. Le signe - signifie que MOTHY V.2 est en retard sur le modèle du SHOM.	26
Tableau 13.1 : Erreurs quadratiques moyennes (en m) sur les six ports sur différents domaines entre le modèle du SHOM et les deux modèles MOTHY sur la période allant du 15 avril à 12 heures jusqu'au 20 avril 2006 à 12 heures.	34

Listes des sigles et acronymes

- **ALADIN** : Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational
- **ARPEGE** : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
- **CEPMET** : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
- **DP** : Direction de la Production
- **Dprévi/Mar** : Division Marine et Océanographie, Direction de la Prévision
- **EDF** : Electricité De France
- **em** : erreur moyenne
- **eqm** : erreur quadratique moyenne
- **ERS** : European Remote Sensing satellite
- **FES2002** : Finite Element Solution 2002
- **IFS** : Integrated Forecast System, modèle du Centre Européen de Prévision à moyenne échéance
- **IFREMER** : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
- **LEGOS** : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
- **LNHE** : Laboratoire Nationale d'Hydraulique et d'Environnement
- **MOTHY V.1** : Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures Version 1 (opérationnel)
- **MOTHY V.2** : Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures Version 2 (nouvelle version)
- **NM** : Niveau Moyen
- **OHI** : Organisation Hydrographique Internationale
- **SHOM** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
- **TELEMAC 2D** : Outil intégré de modélisation dans le domaine des écoulements à surface libre
- **TOPEX/POSEIDON** : TOPographie de l'EXpérience Océan (satellite)

Annexe

Annexe I

Position des marégraphes sur le domaine GAMA

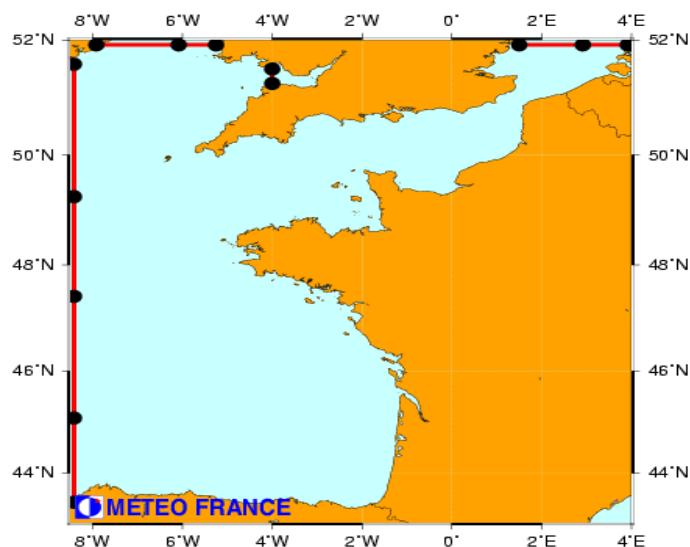


Figure I.1 : Carte donnant la position des 13 marégraphes sur le domaine GAMA.

Forçage de la marée avec les données du LEGOS

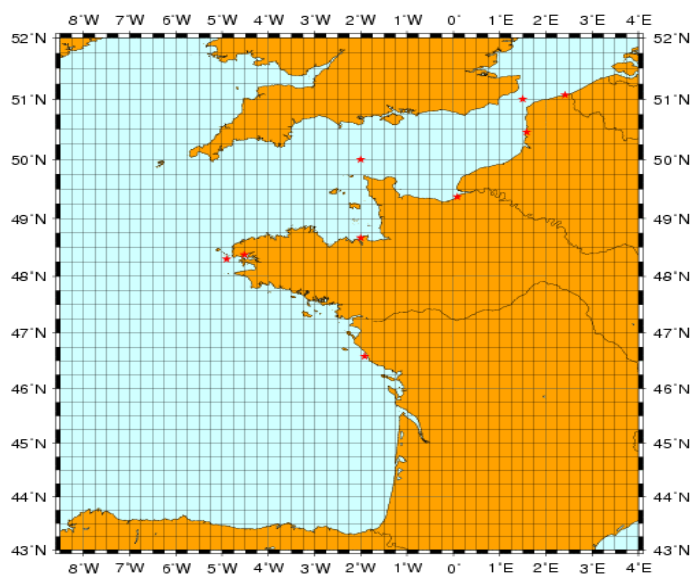


Figure I.2 : Carte donnant les points sur les bords ouest et nord où est effectué le forçage de la marée dans la nouvelle version de MOTHY (points tous les 0,25°).

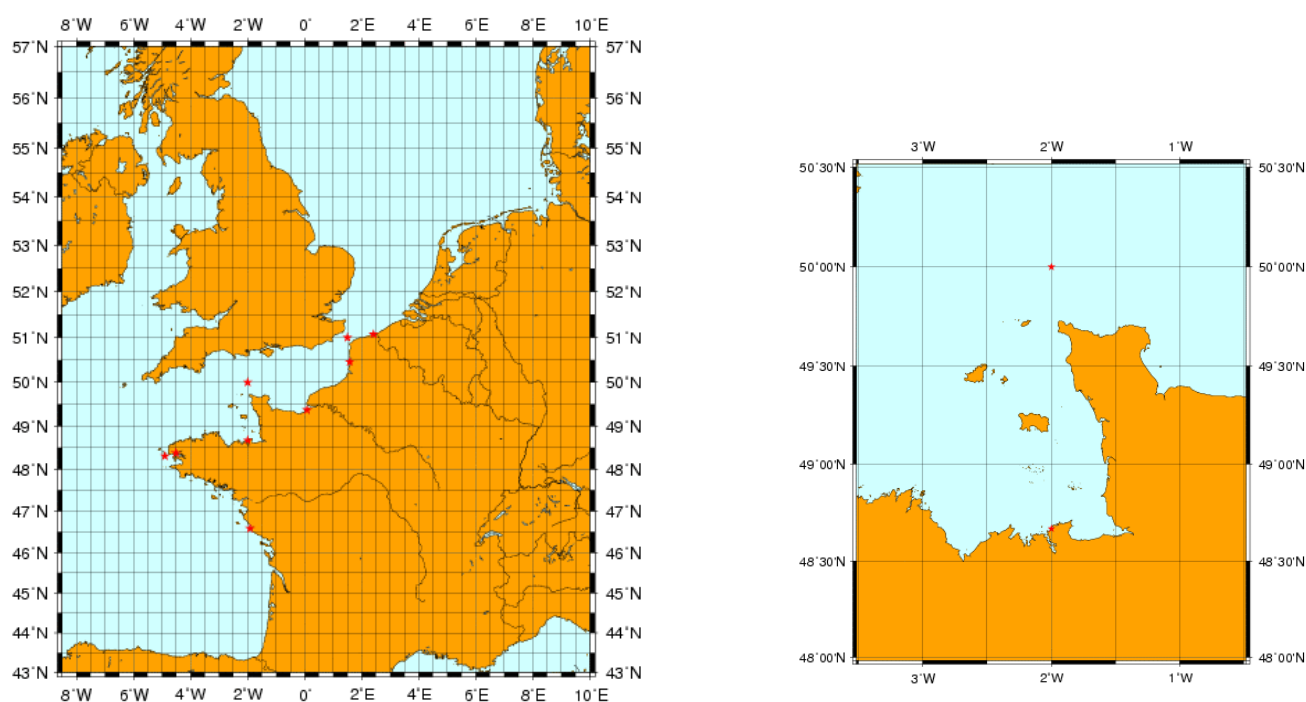
Annexe II

Niveau Moyen des différents ports

❖ Les ports :

- Dunkerque : 3,21 m ;
- Boulogne-sur-Mer : 4,51 m ;
- Le Havre : 4,42 m ;
- Saint-Malo : 6,68 m ;
- Brest : 3,86 m ;
- Les Sables d'Olonne : 3,12 m.

Cartes des domaines



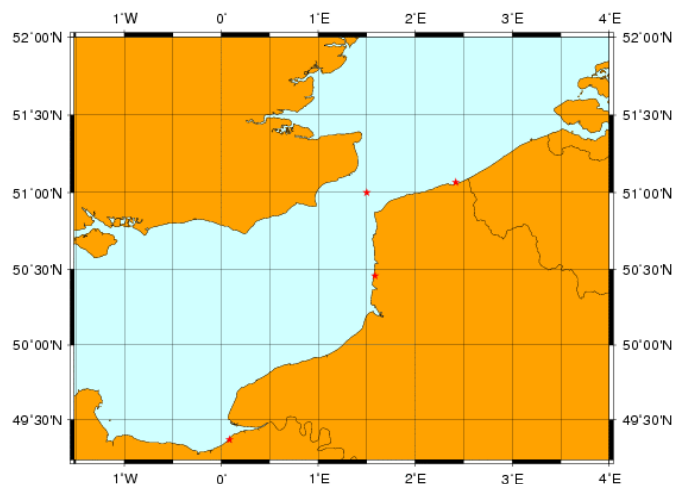
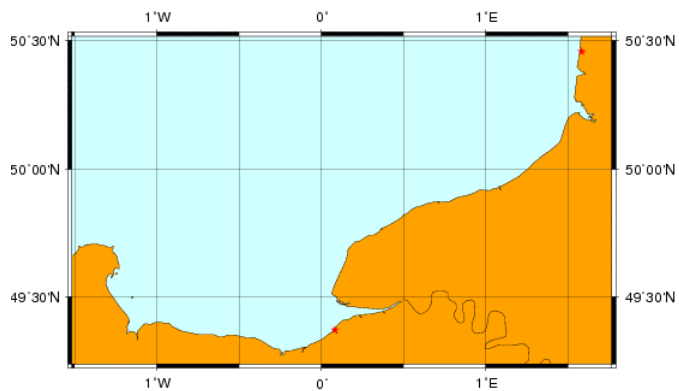


Figure II.2 : *Domaine SEINE (à gauche) et domaine MPDC (à droite).*

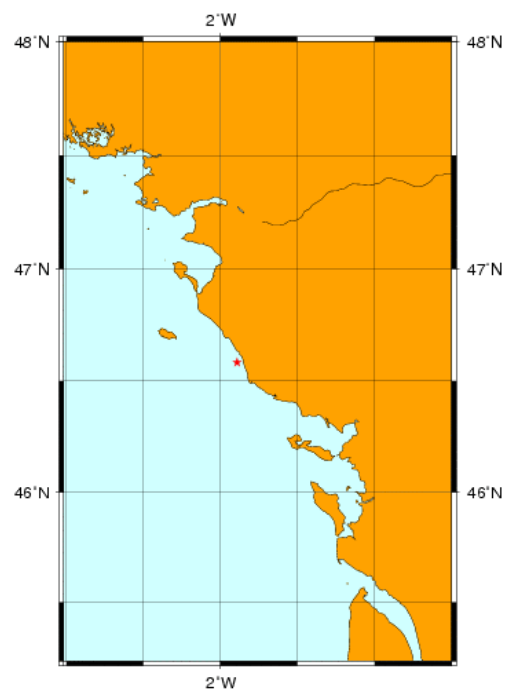
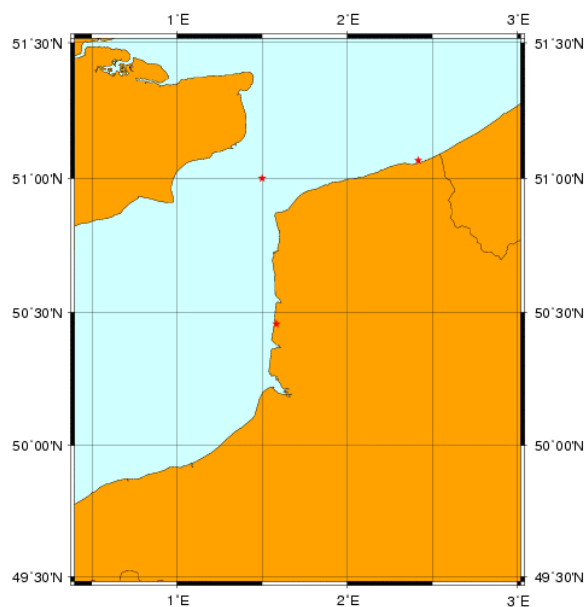


Figure II.3 : *Domaine CALAIS (à gauche) et domaine YEU (à droite).*

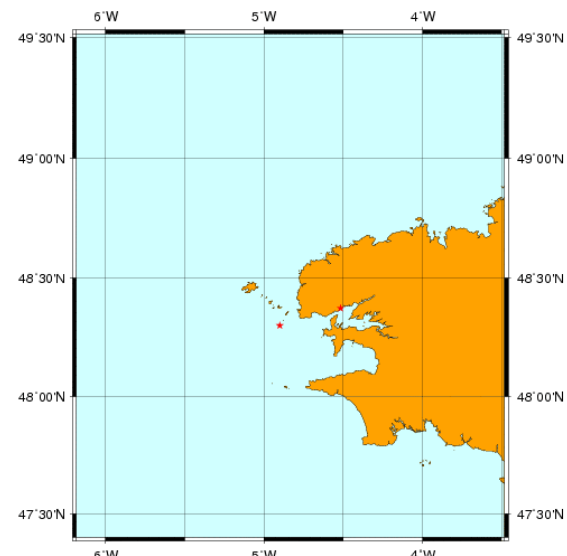
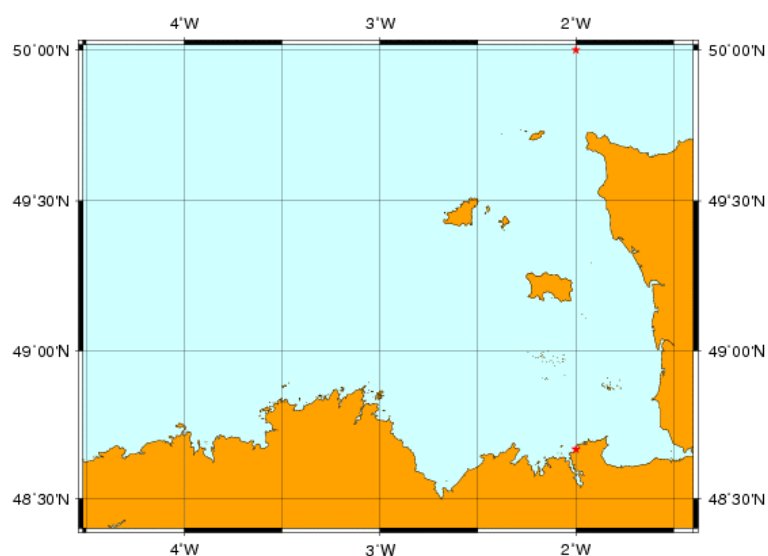


Figure II.4 : *Domaine MICHEL (à gauche) et domaine IROISE 1 (à droite).*

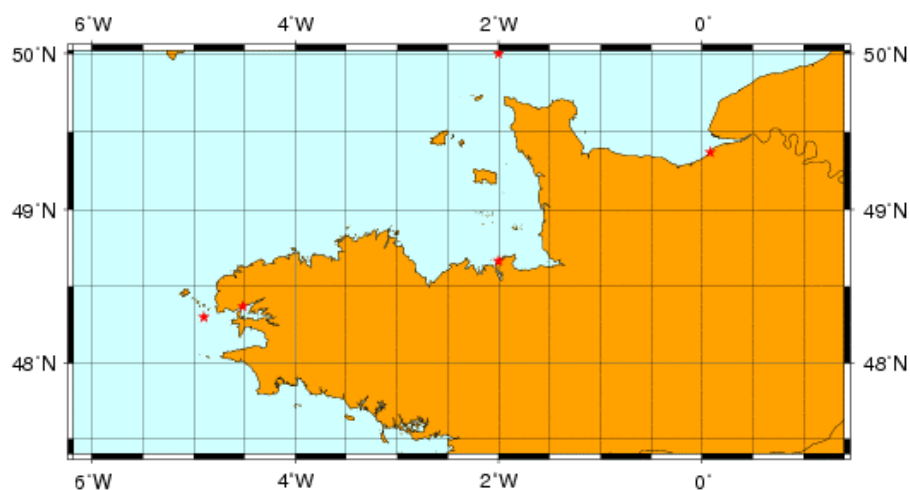


Figure II.5 : *Domaine IROISE 2 étendu.*

Annexe III

Position des points

Grands domaines

❖ Les ports :

▪ Dunkerque :	longitude : 02,4166° ;	latitude : 51,1503°
▪ Boulogne-sur-Mer :	longitude : 01,5833° ;	latitude : 50,4568°
▪ Le Havre :	longitude : 00,0833° ;	latitude : 49,3680°
▪ Saint-Malo :	longitude : -02,0000° ;	latitude : 48,6675°
▪ Brest :	longitude : -04,5165° ;	latitude : 48,3885°
▪ Les Sables d'Olonne :	longitude : -01,9166° ;	latitude : 46,5833°

❖ Les points en mer :

▪ Pas de Calais :	longitude : 01,5000° ;	latitude : 51,0000°
▪ Cap de la Hague :	longitude : -02,0000° ;	latitude : 50,0000°
▪ Iroise :	longitude : -04,9000° ;	latitude : 48,3000°

Petits domaines

❖ Les ports :

▪ Dunkerque :	longitude : 02,4166° ;	latitude : 51,0670°
▪ Boulogne-sur-Mer :	longitude : 01,5833° ;	latitude : 50,4568°
▪ Le Havre :	longitude : 00,0833° ;	latitude : 49,3680°
▪ Saint-Malo :	longitude : -02,0000° ;	latitude : 48,6675°
▪ Brest :	longitude : -04,5000° ;	latitude : 48,3720°
▪ Les Sables d'Olonne :	longitude : -01,9166° ;	latitude : 46,5833°

❖ Les points en mer :

▪ Pas de Calais :	longitude : 01,5000° ;	latitude : 51,0000°
▪ Cap de la Hague :	longitude : -02,0000° ;	latitude : 50,0000°
▪ Iroise :	longitude : -04,9000° ;	latitude : 48,3000°

Annexe IV

Code du programme de traitement des données