

# *Comment représenter les mouvements de la mer : introduction à l'hydrodynamique côtière et à sa modélisation*

## **Introduction**

La zone côtière marine et son littoral sont de natures très variées (lagons, baies, embouchures de rivières, falaises, plages, mangroves...etc...) et présentent des géométries associées très variables. C'est le lieu où s'exacerbent les pressions anthropiques (du fait de la densité de population vivant à proximité du littoral) et climatiques (l'étroitesse des domaines considérés et la barrière naturelle que constitue le continent qui bordent les mers côtières amplifient les réponses au changement climatique). Cela peut engendrer des dégradations de la qualité des eaux marines par le transport de polluants, des mouvements sédimentaires ayant des conséquences importantes, comme le recul du trait de cote ou la formation de bancs de sable, et conséquemment cela impacte fortement les paysages et les habitats marins.

Pour préserver ces environnements vulnérables et tenter de mitiger les effets des changements globaux, un enjeu de connaissance important concerne la dyna-

mique de l'océan côtier, frange réceptacle des apports continentaux naturels ou anthropiques. Etre en mesure de connaître, de comprendre et de prévoir la dynamique océanique ou côtière permet de mieux appréhender le fonctionnement des écosystèmes marins.

C'est l'objet de l'hydrodynamique qui fait partie d'une façon générale de l'étude des fluides en mouvement ou encore Mécanique des Fluides : ce domaine s'attache à étudier la façon dont les forces génèrent les mouvements de l'eau.

Par différentes techniques exposées plus loin, on peut mesurer un ou plusieurs paramètres de ce mouvement, par exemple le courant en surface, au fond ou dans une certaine tranche d'eau ; la mesure ainsi obtenue est discrète, c'est-à-dire représentative de ce qui se passe en un point donné ou une zone très particulière et qui plus est pour une période temporelle correspondant à celle de la mise en œuvre du matériel de mesure. Or l'objectif poursuivi est la description du champ complet de ce mou-

vement de la mer tel que le courant dans l'espace (dans les trois dimensions) et dans le temps, ce qui oblige à modéliser ce champ de paramètres et donc à faire appel à des résolutions numériques du problème mathématique continu posé.

Théoriquement, la dynamique des masses d'eau obéit à une série d'équations complexes qui reposent sur des principes fondamentaux de la physique (e.g conservation de la quantité de mouvement, de la masse, de l'énergie interne). Ces équations ont été établies progressivement mais le formalisme actuellement utilisé doit beaucoup aux physiciens français Henry Navier et anglais Georges Stokes qui leur ont donné leurs noms (Figure 1).

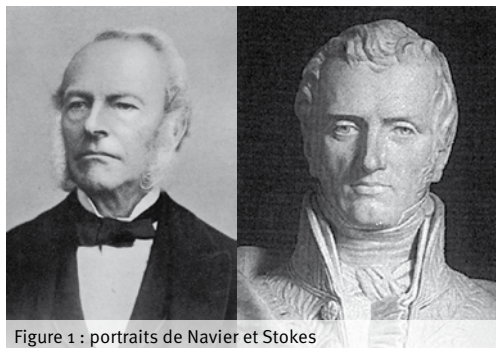


Figure 1 : portraits de Navier et Stokes

La dynamique des fluides a des applications dans de nombreux champs d'investigation : l'hydrodynamique navale étudie par exemple la résistance à l'avancement des navires; dans le cas qui nous occupe elle revêt une forme particulière appelée la dynamique des fluides géophysiques qui a pour objet l'étude des fluides en milieu tournant (ce qui est le cas des fluides à la surface de la terre). Elle est ainsi une science pour l'étude de l'atmosphère et des océans quel que soit l'emprise à

laquelle on s'intéresse : du globe à la mer côtière jusqu'au littoral.

Ainsi, selon les questions abordées, la dynamique des fluides géophysiques doit couvrir une gamme d'échelles plus ou moins étendue, de celle d'un océan pour l'étude des grands courants océaniques comme le Gulf Stream, à une baie fermée de quelques kilomètres, jusqu'à quelques millimètres pour l'étude des processus turbulents. Nous nous limitons ici spécifiquement au cas de la zone côtière, dont les dimensions caractéristiques s'étendent sensiblement de la centaine de mètres à quelques centaines de kilomètres.

La complexité intrinsèque des équations de Navier-Stokes (notamment liée à leur caractère non linéaire), associée à la complexité des géométries auxquelles on s'intéresse généralement en milieu côtier, rend impossible la résolution exacte de ces équations et nécessite l'usage d'autres méthodes que purement théoriques.

Historiquement, afin de reproduire le mouvement des marées et l'effet de l'hydrodynamique sur un secteur donné, on a eu recours à l'utilisation de modèles réduits. Dans les années 1970, EDF et le LCHF (Laboratoire Central d'Hydraulique de France) ont construit une maquette (Figure 2) permettant d'étudier la problématique d'ensablement et de l'aménagement de la baie du Mont-Saint Michel. Des cuves à eau permettaient de reproduire le mouvement lié aux marées mais également les arrivées d'eau douce par les rivières. Avec le développement de l'informatique et la croissance rapide de la puissance de calcul associée, ces techniques de modèles réduits ont été supplantées essentiellement par de la

modélisation numérique. Ces codes informatiques constituent un des méthodes actuellement accessibles pour obtenir de l'information spatiale et temporelle sur les caractéristiques des écoulements en zone marine.



Figure 2 : Image de maquette LCHF de la Baie du Mont Saint Michel.

1

## Moteurs de la circulation et représentation numérique

La circulation côtière est essentiellement dépendante de quatre facteurs : la marée, le vent, les différences de densité des fluides considérés et enfin les courants induits par la houle.

**Courants de marée, courants de vent, courants de densité, courants induits par la houle.**

### *Les courants de marée*

La marée désigne la variation cyclique des niveaux de la mer ou de l'océan où alternativement le mouvement est montant (on parle de « flot ») puis descendant

(« usant »). La marée est générée par la force de gravitation de la lune et du soleil. Du fait des mouvements respectifs de ces astres par rapport à la terre, de la forme des bassins océaniques, du caractère tournant du référentiel dans lequel on étudie les mouvements de l'océan (la terre tourne sur elle-même !) la marée à la surface de la terre est un phénomène à la fois très déterministe (on peut prédire en un lieu donné longtemps à l'avance à partir des observations passées du niveau de la mer ceux qui vont advenir) et complexe (la forme spatialisée de l'onde de marée à la surface du globe est tout sauf intuitive). Ainsi, selon l'endroit où l'on se trouve sur la Terre, la marée peut avoir des périodes et des amplitudes très différentes (semi-diurne, diurne ou un mélange des deux).

Ici, en Nouvelle-Calédonie, la marée est de nature semi-diurne à inégalité diurne, c'est-à-dire avec deux pleines mers et deux basses mers par jour mais avec une différence d'amplitude notable (hauteur d'eau) entre les deux basses mers et les deux hautes mers consécutives.

On appelle marnage la différence de hauteur d'eau entre une pleine mer et une basse mer consécutives. Le record du monde de marnage se trouve au Canada en baie de Fundy où l'on peut observer jusqu'à 19m de marnage. En Nouvelle-Calédonie le marnage maximum est de l'ordre de 1,8m.

Les variations du niveau de la mer liées à la marée induisent des courants horizontaux. La force et la direction de ces courants varient selon l'instant de la marée. La bathymétrie (relief du fond marin) et la topographie du littoral (cap, île, passe)

peuvent imposer aux masses d'eau de transiter dans des zones étroites engendrant ainsi une forte accélération et des courants de marée localement très intenses. Ce phénomène est bien connu des marins qui empruntent le canal Woodin ou les passes de la Havannah et de la Sarcelle, dans le Grand Sud avec des vitesses simulées par les modèles de l'ordre de 2 m/s (3 à 4 nœuds).

Certaines passes du récif de Cook dans le Grand Lagon Nord sont également concernées par le même phénomène. Dans le monde, les courants de marée les plus intenses peuvent atteindre jusqu'à 22 nœuds et sont signalés dans le détroit Norvégien de Saltstraumen (Figure 3).



Figure 3 : Courants de marée les plus intenses du monde : Détroit de Salstraumen (Norvège).

Au-delà des courants instantanés, à plus grande échelle de temps (i.e. au-delà de la période de la marée), la marée induit du transport à long terme des masses d'eau d'autant plus important que les courants instantanés sont forts. C'est par exemple le cas dans la Manche où le phénomène est assez intense à proximité de la côte (quelques kilomètres) autour des îles anglo-normandes et du cap de la Hague.

## **Les courants de vent ou de dérive**

A la surface de la mer, le vent va entraîner les couches d'eau superficielles. Ce déplacement de l'eau en surface va se transmettre par viscosité aux couches plus profondes : c'est le courant de vent ou courant de dérive. Un ordre de grandeur raisonnable de l'intensité des courants de dérive (i.e. leur vitesse) est d'environ 3% de la vitesse du vent en dehors des phénomènes exceptionnels comme les cyclones.

La rotation de la Terre (induisant la force de Coriolis) modifie ces courants de dérive en les déviant vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. En théorie, le courant de surface est dévié de 45° par rapport à la direction du vent et le transport induit sur toute la couche de surface entraînée par le vent (quelque dizaine de mètres, appelée couche d'Ekman) est lui dirigé à 90° de la direction du vent.

En milieu côtier la proximité de la barrière physique que constitue la terre introduit une discontinuité dans le transport induit par le vent et a pour effet, selon la direction dans laquelle souffle le vent, de faire remonter du fond à la surface des eaux profondes (upwelling) ou au contraire d'entraîner vers le fond (downwelling) des eaux de surface.

Sur la côte Ouest calédonienne, ces phénomènes d'entraînement de la couche de surface sous l'effet d'alizés soutenus déclenchent des phénomènes d'upwelling qui ont pour effet de faire remonter sur la pente externe du récif barrière des masses d'eau froides et chargées en nutriments provenant des profondeurs (Figure 4).

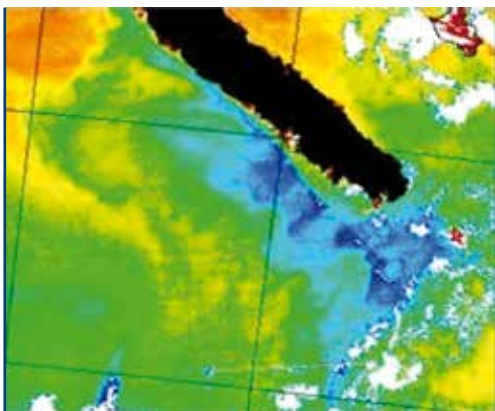


Figure 4 : Refroidissement remarquable de la température de surface en Février 2003 capturé par le satellite NOAA associé à un événement d'upwelling majeur (Crédit : CSIRO/George Cresswell), les eaux froides sont en bleu.

Il est important de noter ici que ce phénomène d'upwelling, particulièrement puissant sur certaines côtes (Maroc et Mauritanie, Angola, Chili...) a des implications très directes sur l'écosystème marin et la chaîne alimentaire. En effet ces remontées d'eaux froides entraînent vers la surface des eaux riches en sels nutritifs qui, sous l'effet de la lumière, sont productives (photosynthèse et blooms de phytoplancton), lui-même consommé par le zooplancton qui entraîne la prédation par les petits pélagiques (sardines, anchois, voir Figure 5) et celle des prédateurs supérieurs (bonites, thons, marlins...). Ceci explique que les upwellings soient des zones de pêche intéressantes.

Figure 5 : Regroupement de sardines (Source : olvea.com)



## Les courants de densité

L'hydrologie (température et salinité) des masses d'eau est très variable en mer côtière où l'on rencontre les contrastes les plus forts entre d'une part les eaux océaniques salées et d'autre part les eaux apportées par les fleuves et rivières (quasiement douces) ou bien encore entre les eaux de surface chaudes et les eaux de fond plus froides qui peuvent être juxtaposées au cours de processus d'upwelling ou de downwelling. Ces différences de caractéristiques hydrologiques induisent des différences de densité et la juxtaposition de masses d'eau de densité différente induit des mouvements relatifs : les eaux lourdes, froides, ont tendance, sous l'effet de la gravité, à se placer sous les eaux chaudes conduisant par exemple à une stratification verticale.

## Les courants induits par la houle

Nous intéressons ici plus particulièrement aux phénomènes propres aux lagons semi-fermés possédant des passes (atolls de Polynésie ou lagons de Nouvelle-Calédonie par exemple). En effet la houle extérieure déferlant sur le récif barrière induit des entrées d'eau par phénomène de surverse qui emplissent les lagons. Ceux-ci doivent alors se vidanger par gravité par les passes communiquant avec la mer ouverte. Il en résulte, pour les systèmes évoqués plus

haut, l'apparition de courants de vidange et ce quelle que soit l'instant de la marée. Ainsi, dans les passes d'atolls tel que celles de Rangiroa aux Tuamotu, lorsque l'atoll est soumis aux grandes houles de sud la passe peut fonctionner en continu dans le sens sortant. Dans les passes du lagon étroit de la Côte Ouest de Nouvelle-Calédonie (cf. faille aux requins de la région de Gouaro Deva à Bourail) on peut assister au même type de processus. Il est à noter que les vagues ont également des effets sur la circulation mais ils ne sont pas abordés ici.

## • La représentation numérique dans les modèles

La dynamique des fluides est mathématiquement décrite par des équations de Navier-Stokes. La résolution de ce système d'équations est une tâche complexe et fait partie d'un des sept problèmes du millénaire. Dans le cas général, on ne sait pas trouver de solution à ces équations. Cependant, quelques hypothèses simplificatrices combinées à des méthodes de résolution approchée permettent de les résoudre pour par exemple décrire la dynamique marine ou atmosphérique. Cela nécessite des codes informatiques complexes faisant appel à des ordinateurs à très grandes capacités de calcul. La Nouvelle-Calédonie possède, sur le campus de l'IRD, une capacité de calcul permettant ce type de travail.

L'étape préliminaire avant de pouvoir approcher la dynamique d'un secteur est de contextualiser géométriquement le problème à résoudre. En zone littorale, les contraintes morphologiques naturelles sont fortes : la bathymétrie peut varier bru-

talement et les traits de côte peuvent être très irréguliers. L'espace sur lequel on souhaite travailler est découpé (« discrétisé ») en petits volumes élémentaires (cubes ou prismes) dans lesquels seront calculés les évolutions temporelles et spatiales des paramètres marins (e.g niveau d'eau, courant, hauteur d'eau, température...). La grille ainsi obtenue est le maillage de calcul. Différents types de maillage sont mis en œuvre selon les méthodes numériques employées et le choix des volumes élémentaires pour résoudre les équations de l'hydrodynamique. La figure 6 est un exemple d'une portion de grille cartésienne MARS3D à 300m de résolution utilisée sur la côte Est de Nouvelle-Calédonie.

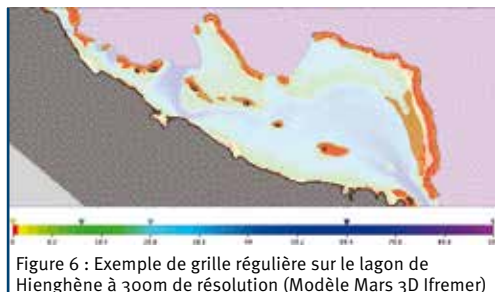


Figure 6 : Exemple de grille régulière sur le lagon de Hienghène à 300m de résolution (Modèle Mars 3D Ifremer)

Plusieurs types de données sont nécessaires à la modélisation hydrodynamique. Tout d'abord, des données de sondes bathymétriques et de trait de côte doivent être utilisées : ce sont les informations de base qui permettront d'envisager la discrétisation de l'espace et de construire le maillage.

Les formes géométriques à représenter (îles, caps, détroits, baies, chenaux...) et la densité d'informations disponible en terme de bathymétrie conditionneront la résolution finale des maillages.

Aux limites ouvertes (les limites qui sont en mer) des modèles, certaines conditions, comme le niveau d'eau, les courants, la température et la salinité, doivent être imposées. Selon les grandeurs à imposer, ces conditions peuvent provenir d'autres modèles de plus grandes emprises ou de climatologies basées sur un grand nombre d'années d'observations (mesures). L'interface air/mer (surface de l'océan) est également soumise à des contraintes exercées par l'atmosphère (vent, flux de chaleur). Ces processus sont également intégrés dans le modèle hydrodynamique par un forçage issu de modèles atmosphériques. Pour bien représenter les courants de densité mais également étudier l'influence spatiale des apports continentaux (eau douce, sédiments, nutriments), les débits de ces dernières doivent être aussi prises en compte et introduits dans les modèles. Enfin, pour la quatrième force : les vagues, dont on a vu qu'elles peuvent entraîner des courants spécifiques ; des observations ou des modèles de houle seront nécessaires.

2

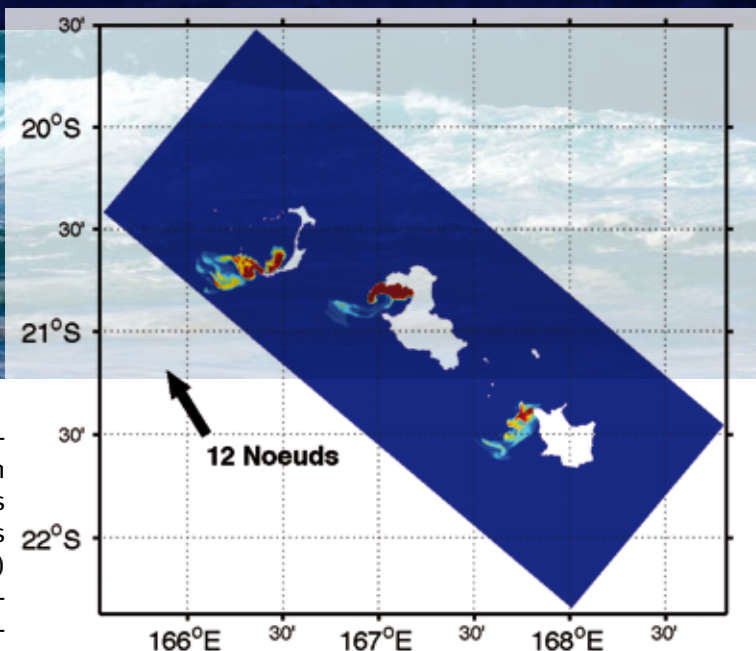
## Que représente-t-on dans les modèles ?

Les modèles hydrodynamiques permettent donc de simuler la circulation des masses d'eau mais également l'évolution de ses propriétés au cours du temps c'est-à-dire la température, la salinité, les niveaux, etc... L'information restituée par les modèles numériques ne peut pas être plus fine que les éléments de maillage évoqués précé-

demment. Ce que le modèle est capable de restituer est donc une grandeur moyenne sur l'élément de base (maille de calcul). Les échelles des processus pouvant être étudiés sont donc limitées par la résolution de l'outil. Par exemple, l'effet d'une patate de corail sur la circulation de quelques mètres de diamètre ne peut pas directement être étudié dans un modèle disposant d'une maille de calcul de plusieurs centaines de mètres.

Dans le cas d'écoulement de fluides, on distingue deux types de régimes liés à la viscosité : les écoulements laminaires et les écoulements turbulents. Dans le cas d'écoulement laminaire, deux particules voisines à un instant donné le seront également aux instants suivants. Dans le cas d'un écoulement turbulent, le comportement est plus désordonné et les vitesses des particules en mouvement présentent des caractères tourbillonnaires. Cela se produit lorsque l'énergie cinétique (fonction de la masse et du carré de la vitesse) est importante devant les forces de viscosité qui s'opposent au mouvement. Dans l'océan côtier, les écoulements sont par nature extrêmement turbulents presque partout et tout le temps. On retrouve ces phénomènes de turbulence induits par exemple par des obstacles sur la trajectoire de l'écoulement (e.g. à proximité du fond) ou encore par des mouvements de convection liés aux plongées des masses d'eau.

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes en régime turbulent et aux échelles imposées par le maillage, on procède à une transformation du système d'équations en système RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations). Cette transformation,



dite à fermeture turbulente, permet, par un calcul approché des deux composantes (écoulement moyen) de résoudre assez correctement les équations de base.

C'est ce qui est utilisé dans la modélisation hydrodynamique telle que pratiquée par les chercheurs et les ingénieurs.

Le pendant de la discrétisation dans l'espace (subdivision en maille élémentaire de l'espace) est, pour le temps, la discrétisation temporelle ; de même que l'on n'est pas capable de résoudre les équations à une échelle plus fine que la maille de calcul que l'on s'est fixée, on ne peut décrire l'écoulement océanique qu'à des instants que l'on s'est prescrit. Ainsi, l'écoulement est résolu à un instant  $t$  en utilisant l'état à l'instant précédent ; on peut ainsi calculer de proche en proche l'évolution dans le temps de la circulation marine et des propriétés des masses d'eau. Pour illustrer l'évolution dans le temps et l'espace, la figure 7 représente des concentrations en larves simulées par le code MARS3D après 2 jours de transport et de dilution

Figure 7 : Concentrations en larves le 11/04/2014 après 2 jours de transport par les courants marins. Les couleurs rouges représentent les plus fortes concentrations

par les courants marins suite à une ponte « fictive » synchrone sur 3 sites : pointe de Mouly à Ouvéa, secteur de Ngöni à Lifou et au cap Machau à Maré.

### 3 La confrontation aux observations terrain

Une fois la configuration de modèle en place, le modélisateur est donc en mesure de fournir des champs simulés et leur évolution dans le temps (voir figures ci-dessous).

Afin de s'assurer et d'améliorer la pertinence des informations produites, le modélisateur se doit d'ajuster le plus fine-



ment possible les paramètres physiques et numériques de son modèle. Pour cela, les observations en mer présentent de multiples intérêts. Ces mesures permettent tout d'abord de mettre en évidence des processus physiques en milieu côtier. Elles permettent d'affiner la représentativité des simulations numériques (via la paramétrisation) mais également de quantifier les erreurs. Il existe un panel important d'instruments de mesure océanographique ; ils sont déployés selon le type de processus à mettre en évidence et/ou le paramètre à affiner au sein du modèle.

On se limitera ici à donner quelques exemples types d'instruments et d'observations physiques usuelles sur les variables clefs en reprenant le découpage des quatre moteurs de la circulation évoqués plus haut.

Une des premières mesures d'intérêt pour la modélisation côtière concerne la marée. Ce sont en effet les ondes de marée qui conditionnent/génèrent les courants de marée associés. La marée, phénomène visible à l'œil nu se caractérise par une évolution du niveau de la surface libre. Pour quantifier l'évolution temporelle du niveau d'eau, des capteurs de pression (installés au fond) sont utilisés.

Ceux-ci permettent de mesurer exactement à chaque instant la hauteur d'eau entre la surface et le fond.

En fonction de la fréquence d'échantillonnage et des traitements ultérieurs réalisés, les capteurs de pression permettent de quantifier la marée, les surcotes/décotes liées aux conditions météorologiques ainsi que les états de mer (hauteur significative



Figure 8 : Profil réalisé par bathysonde.



Figure 9 : Pose de capteurs de température et de pression (source : Les Antipodistes).

masse volumique (courants de densité) qui elle-même est liée à la fois à la température, la salinité et la pression, des mesures sur la colonne d'eau sont réalisées avec des bathysondes (figure 8) avec lesquelles des profils sont réalisés de la surface jusqu'au fond.

Ces profils permettent de mesurer la distribution verticale des propriétés en un point et à un instant donné.

Afin de connaître la direction et la vitesse des courants, les courantomètres étaient historiquement conçus sur le principe de rotors s'orientant dans le sens de l'écoulement. Ces mesures fournissaient donc des informations ponctuelles. Avec les avancées technologiques, ces instruments ont été remplacés par des courantomètres acoustiques (basés sur l'effet Doppler) qui permettent, grâce aux particules présentes dans la colonne d'eau de mesurer vitesse et direction du courant du fond à la surface.

Pour déterminer l'action du vent sur la circulation de surface, on a recours à des flotteurs de surface suivis par satellite. Ces flotteurs permettent de suivre la trajectoire

d'une masse d'eau de surface sous les actions conjointes du vent et des vagues. Confrontés aux résultats des modèles numériques, elles permettent de paramétriser les échanges d'énergie entre la surface de l'eau et l'atmosphère.

Pour la houle on a recours à des houlographes qui enregistrent période, direction et hauteur au plan statistique.

Un dernier exemple d'observations est l'utilisation d'images satellites. Celles-ci permettent d'obtenir une information spatialisée sur les niveaux ou encore sur la température de surface (Sea Surface Temperature). Ces images satellites permettent donc de mettre en évidence des structures spatiales (e.g tourbillons, jets, upwellings comme sur la figure 4 par exemple) et sont donc très pertinentes pour valider la justesse spatiale des structures générées dans le code numérique.

Pour améliorer la pertinence des modèles numériques une des techniques consiste à assimiler des données pour contraindre le modèle à se recalibrer numériquement sur les données observées. Pour ce faire, les données observées sont injectées dans les simulations afin de faire converger les résultats informatiques vers les valeurs réalistes.

## 4 Applications de la modélisation côtière

Les champs d'application de la modélisation hydrodynamique côtière sont multiples.

Seuls quelques exemples non exhaustifs sont proposés ici.

Pour les personnes naviguant en mer (plaisanciers, professionnels), ces données de courant et de marée constituent une aide à la navigation. Cela permet par exemple aux voiliers de prévoir le moment le plus propice pour traverser une passe afin d'éviter de lutter contre le courant. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), produit, à l'aide de modèles numériques, des atlas de courant de marée à destination des usagers de la mer.

Pour calibrer les modèles numériques, on a recours à des simulations rejouant des événements passés, mais une fois cette étape réalisée, les modèles peuvent être utilisés de façon opérationnelle. L'objectif de l'océanographie opérationnelle consiste à suivre l'évolution de l'environnement marin mais également à prévoir son évolution à court terme.

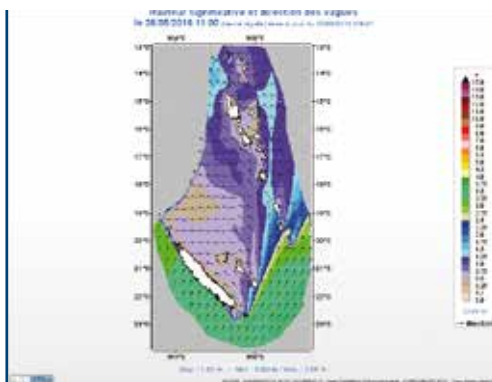


Figure 10 : Exemple de modélisation opérationnelle : Prédiction hauteurs et directions des vagues (26/05/2016 à 11h).

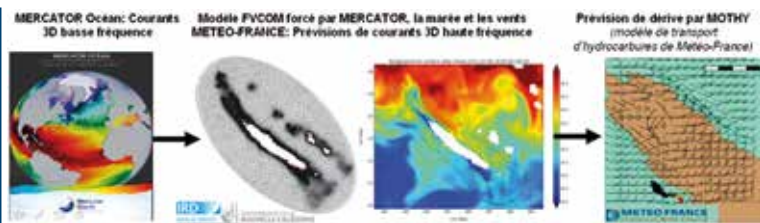


Figure 11 : Système d'océanographie opérationnelle adapté aux lagons calédoniens : le modèle Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) permet de réaliser des prévisions de dérive d'objet de diverse nature (dont des hydrocarbures) au moyen du modèle de transport d'hydrocarbures MOTHY (Météo-France).

Une autre application très concrète de la modélisation dans des cas extrêmes est la dispersion de nappes d'hydrocarbures lors de naufrages. Ces nappes de pétrole présentent en effet

L'IFREMER et le SHOM ont coordonné la mise en place d'un système d'océanographie opérationnelle : Previmer. Son objectif principal est de produire en routine des analyses et des prévisions sur l'état de l'environnement marin.

Cela permet par exemple d'anticiper de forts évènements de surcote où les risques de submersion du littoral sont accrus ou encore de disposer de prévisions de l'évolution des hauteurs et directions des vagues attendues (Figure 10).

une menace pour le milieu marin et il donc important de pouvoir anticiper avec précision la dérive de ces polluants.

Fruit d'un partenariat entre Météo-France, l'IRD et le Gouvernement de Nouvelle-Calédonie, le Centre de Coordination de Sauvetage Maritime de Nouvelle-Calédonie (MRCC) et le dispositif ORSEC Maritime pourront bientôt s'appuyer sur une chaîne de modélisation de la dispersion des hydrocarbures et d'objets flottants, comme illustré Fig-11.



En terme d'ingénierie, une des applications courantes de la modélisation consiste en l'étude des impacts d'un aménagement sur la zone côtière.

En effet, la construction d'ouvrages maritimes (ports par exemple) va modifier la circulation des masses d'eaux, entraînant potentiellement des effets indésirables (forte sédimentation dans certaines zones, taux de rétention élevé).

Un autre exemple d'actualité de l'utilité des modèles est l'application aux Energies Marines Renouvelables (EMR).

En effet, de nombreuses études voient le jour pour explorer les sites potentiels d'implantation d'hydroliennes produisant de l'énergie à partir des courants marins. D'autres applications concernent la détermination du point de sortie d'un émissaire et la définition du lieu où la dispersion du rejet dans le milieu sera la plus forte et où l'impact sur des zones sensibles minimisé. De même en est-il de la dispersion des panaches de rivières en mer sous différentes conditions de débit et de conditions météorologiques...

D'autres applications concernent directement le milieu vivant, Si l'outil de modélisation permet de bien étudier la dynamique de traceurs conservatifs, différentes lois, relatives au comportement propre du traceur considéré sont intégrables dans le code et permettent des applications ciblées. Ainsi en est-il de la dispersion de bactéries en mer intégrant un modèle de décroissance avec le temps lié à l'effet de la salinité et de la température ; l'étude de la dérive de larves de différentes espèces et leurs dispersions sous l'effet des courants relève des mêmes exigences en terme de connaissance, notamment pour l'optimisation de la pose de systèmes de captage (Figures 12a) ; application pour le captage de larves d'huîtres perlières dans les atolls de Polynésie par utilisation du modèle Mars 3D de

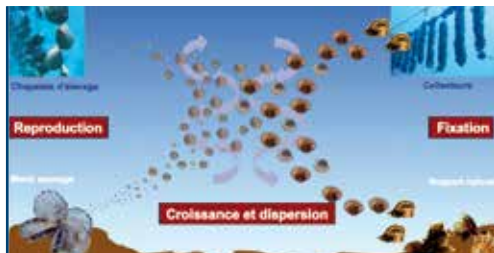


Fig 12.a : Cycle de vie de l'huître perlière (Source Y. Thomas)

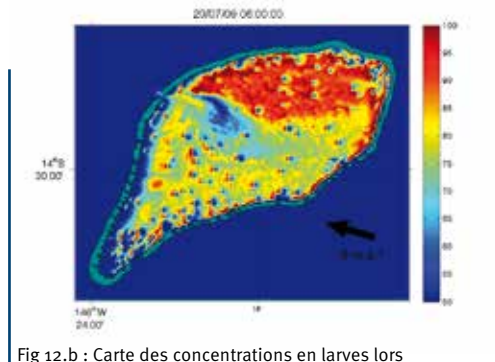


Fig 12.b : Carte des concentrations en larves lors d'une simulation réaliste.

l'Ifremer). La modélisation hydrodynamique peut donc notamment être utilisée pour comprendre et décrire la connectivité des populations marines.

## Conclusion

Nous avons vu dans cet article, malgré la complexité des formulations mathématiques et les enjeux à relever que la modélisation numérique permet de représenter un ensemble d'éléments relatifs aux mouvements de la mer à différentes échelles spatiales et temporelles ; ces mouvements dont la connaissance est déterminante dans la résolution de questions multiples sur le littoral, dans les lagons ou en mer côtière ouverte.

Les applications tant en matière de recherche (compréhension de phénomènes) qu'en termes opérationnels sont nombreuses et ces outils font désormais partie des instruments utiles notamment en matière d'ingénierie côtière (dimensionnement d'ouvrages, pose d'émissaires, construction de digues, dragages, recharges de plages, étude du potentiel énergétique...), d'études d'impact (qualité des eaux, transport de polluants en



surface, dans la masse d'eau, au fond...), mais utiles aussi à la prise de décision en matière d'aménagement : présélection de sites favorables à différentes activités comme l'aquaculture, études de recrutement dans des perspectives de pêche...

Nous insisterons sur les critères de qualité des codes informatiques utilisés, de leur facilité de mise en œuvre et de leur validation par comparaison entre les résultats du modèle et des données et mesures de terrain.

Il n'existe pas de modèle universel ; chacun est adapté à la résolution de questions spécifiques aussi voit-on se développer des approches multithématiques permettant de répondre aux questions complexes posées en milieu littoral et côtier basées sur le couplage de différents modèles selon leurs performances.



**Romain Le Gendre**  
 Physicien Modélisateur  
 IFREMER LEAD NC  
 Nouvelle-Calédonie  
 romain.le.gendre@ifremer.fr



**Franck Dumas**  
 Physicien - Modélisateur  
 Etablissement Principal du Service  
 Hydrographique de la Marine  
 SHOM Brest - France  
 franck.dumas@shom.fr



**Jérôme Lefèvre**  
 Ingénieur de recherche  
 LEGOS IRD Nouvelle-Calédonie  
 jerome.lefevre@ird.fr



**Lionel Loubersac**  
 Océan Avenir NC  
 Co-fondateur du Cluster Maritime  
 Nouvelle-Calédonie  
 lionel.loubersac@outlook.fr



## Webographie

### **SHOM**

[www.shom.fr](http://www.shom.fr)

### **PREVIMER**

[www.previmer.org](http://www.previmer.org)

### **Modèle MARS3D IFREMER**

[wwz.ifremer.fr/mars3d](http://wwz.ifremer.fr/mars3d)

### **Modèle MOTHY**

[www.meteorologie.eu.org/mothy/index-fr.html](http://www.meteorologie.eu.org/mothy/index-fr.html)

### **Modèle FVCOM**

[www.fvcom.smast.umassd.edu](http://www.fvcom.smast.umassd.edu)

# Côté Quai

Pontons flottants modulaires  
Cales sèches flottantes

Tél. 77 69 75 - 78 58 18 | [cotequai@lagoon.nc](mailto:cotequai@lagoon.nc) | [www.candock.com](http://www.candock.com)

© Candock