

Mémoire d'habilitation à diriger la recherche

Université Paul Sabatier, Toulouse

Florent Lyard

*Les processus rapides
de la dynamique océanique
observation et modélisation*

Partie II : prospective scientifique

Directeur de recherche : Y. du Penhoat

Section du CNU : 37

*Les processus rapides
de la dynamique océanique
observation et modélisation*

Partie II : prospective scientifique

Table des matières

Table des matières	4
Résumé court du projet	5
Résumé long du projet.....	6
I. Prospective	7
1. Préambule.....	7
2. Le modèle hydrodynamique T-UGOm	9
2.1. Manifeste pour un nouveau modèle d'océan.....	10
2.2. Situation du modèle et les futures étapes de son développement	11
3. Les chantiers d'applications	14
3.1. Plateau amazonien.....	14
3.2. Atlantique Nord-est et Mer Méditerranée	17
Contexte national et international	19

Résumé court du projet

Les récents progrès de la modélisation ont souligné la nécessité de résoudre simultanément toutes les échelles de l'Océan. La modélisation sur grille non-structurée est une approche très efficace pour étendre le spectre de la résolution des modèles à un coût numérique acceptable. La flexibilité intrinsèque de ces modèles offre des possibilités uniques pour prendre en compte un large spectre d'échelles spatiales et temporelles. Mon projet consiste à explorer pleinement cette voie en développant le modèle pour la dynamique océanique T-UGOm et à le mettre en œuvre notamment sur le chantier AMANDES (plateau de l'Amazonie). T-UGOm a pour vocation d'être un modèle de circulation généraliste. Néanmoins mon objectif est de l'appliquer en priorité aux processus pour lesquels il apportera plus grand bénéfice, c'est-à-dire la dynamique des mers à géométrie complexes et la modélisation des ondes internes. Basé sur les équations primitives, non-Boussinesq, il se distingue par le fait qu'il pourra être opéré en mode non-hydrostatique. Il est conçu afin de pouvoir intégrer un large éventail de schémas numériques et les développements communautaires (UGO et NEMO).

Résumé long du projet

On a assisté au cours de ces dernières années à la reconnaissance de plus en plus large de l'importance de la nouvelle génération de modèles à grilles non-structurées. Les récents progrès de la modélisation océanique ont souligné la nécessité de résoudre simultanément les grandes et les petites échelles de la dynamique océanique.

Mon projet consiste à explorer pleinement cette voie en développant le modèle pour la dynamique océanique T-UGOm et à le mettre en œuvre dans plusieurs chantiers sur lesquels je suis engagé, notamment ***le chantier AMANDES (plateau de l'Amazonie)***. La modélisation sur grille non-structurée est une approche très efficace pour étendre le spectre de la résolution des modèles et ce à un coût numérique acceptable. La flexibilité géométrique intrinsèque de ces modèles offre des possibilités uniques pour les simulations océaniques pour un large spectre d'échelles spatiales et temporelles. T-UGOm a pour vocation d'être un modèle de circulation généraliste et complet en terme de physique. Néanmoins mon objectif est de l'appliquer en priorité aux processus pour lesquels les grilles non-structurées apportent leur plus grand bénéfice, c'est-à-dire la dynamique des régions océaniques à géométrie complexes, comme les mers de plateaux et côtières, la dynamique des ondes internes (forcée par la marée et/ou les coups de vent) et, si un partenariat sur ce thème est trouvé, les processus de convection profonde. Basé sur les équations primitives, il se distingue par le fait que l'approximation de Boussinesq n'est pas faite, et qu'il pourra être opéré en mode non-hydrostatique. Son architecture est conçue afin de pouvoir supporter naturellement un large éventail d'options pour les schémas numériques et la discrétisation spatiale et pour accueillir de façon efficace un ensemble de modules halogènes (éventuellement développés pour des modèles aux différences finies, comme par exemple la turbulence verticale, le forçage atmosphérique ainsi que des modules de bio- et géochimie ou de transport sédimentaires). Ma démarche s'inscrit dans la philosophie du développement communautaire (de type UGO et NEMO) et la situation de la place toulousaine semble idéale à cet égard grâce à la proximité des communautés OPA, HYCOM, SYMPHONIE et ROMS.

I. Prospective

1. Préambule

Ma prospective se nourrit naturellement de l'émergence des nouveaux enjeux scientifiques liés aux interactions de la marée avec la dynamique générale de l'océan, et l'expérience acquise au cours de ces vingt dernières années. De part ma formation, mon expérience professionnelle et enfin goût personnel, je me définis à la fois comme un dynamiqueur de l'Océan et comme un modélisateur numérique. Avant de développer la prospective scientifique, il paraît nécessaire de s'interroger sur le problème de la modélisation numérique. Quelles en sont les fonctions ? Quelles en sont les limites ?

Les fonctions de la modélisation sont multiples, et parfois contradictoires. Le principal objet de la modélisation numérique consiste à reproduire avec la plus grande fidélité les différents processus de la dynamique océanique afin d'en permettre l'étude synoptique et détaillée, et donc sa compréhension. Elle permet également de produire des prévisions, pour les besoins opérationnels ou pour l'étude de l'évolution du climat. Elle offre enfin la description dynamique du médium océanique pour l'étude des systèmes bio-géochimiques et du transport sédimentaires. Suivant son objet, la modélisation tend à se spécialiser afin de répondre plus efficacement aux problèmes scientifiques posés. Cette tendance entropique doit être contrôlée afin de maintenir la population de modèles hydrodynamiques à un niveau acceptable et pour préserver leurs capacités à représenter simultanément l'ensemble des processus importants et leurs interactions. La limitation pratique majeure de l'universalité des modèles provient des capacités de calcul. Ces capacités augmentant sans cesse, on peut se poser la question de savoir à partir de quand seront atteintes leurs limites théoriques, qui sont celles du déterminisme physique. Le problème de la résolution spatiale des modèles illustre parfaitement cette question : jusqu'à quelles échelles la modélisation a-t-elle un sens, ou du moins une utilité ? Doit-on imaginer de résoudre un jour, et non pas paramétrer, les échelles de la turbulence dans les modèles, et cette approche est-elle robuste ? Personnellement, j'en doute. Cependant, nous sommes encore loin aujourd'hui d'atteindre ce seuil critique, autrement dit nous devons continuer à chercher à modéliser toujours plus finement l'Océan en se dotant des outils adéquats.

On a assisté au cours de ces dernières années à la reconnaissance de plus en plus large de l'importance de la nouvelle génération de modèles à grilles non-structurées. Ces modèles sont discrétisés sur des maillages dont la résolution horizontale est localement ajustable en fonction des contraintes hydrodynamiques. Pour les plus sophistiqués d'entre eux, le maillage peut évoluer au cours du temps afin de suivre au plus près ces contraintes hydrodynamiques et leur variation temporelle (advection de fronts ou de tourbillons par exemple). Il existe une large variété d'éléments sur lesquels on peut construire ce type de maillage. En océanographie, les plus répandus sont les éléments triangle en 2D, prismatiques en 3D, mais d'autres éléments sont possibles. Les récents progrès de la modélisation océanique ont souligné un peu plus la nécessité de résoudre simultanément les grandes et les petites échelles de la dynamique océanique. Parmi d'autres, les processus les plus concernés sont les fronts océaniques, la convection profonde et les ondes internes. La modélisation sur grille non-structurée est une approche très efficace pour étendre le spectre de la résolution des modèles et ce à un coût numérique acceptable. La flexibilité géométrique intrinsèque de ces modèles offre des possibilités uniques pour les simulations océaniques pour un large spectre d'échelles spatiales et temporelles. Parmi ces possibilités on trouve la représentation précise et efficace des traits de côtes et des topographies complexes, et une résolution spatiale variable de la grille qui peut

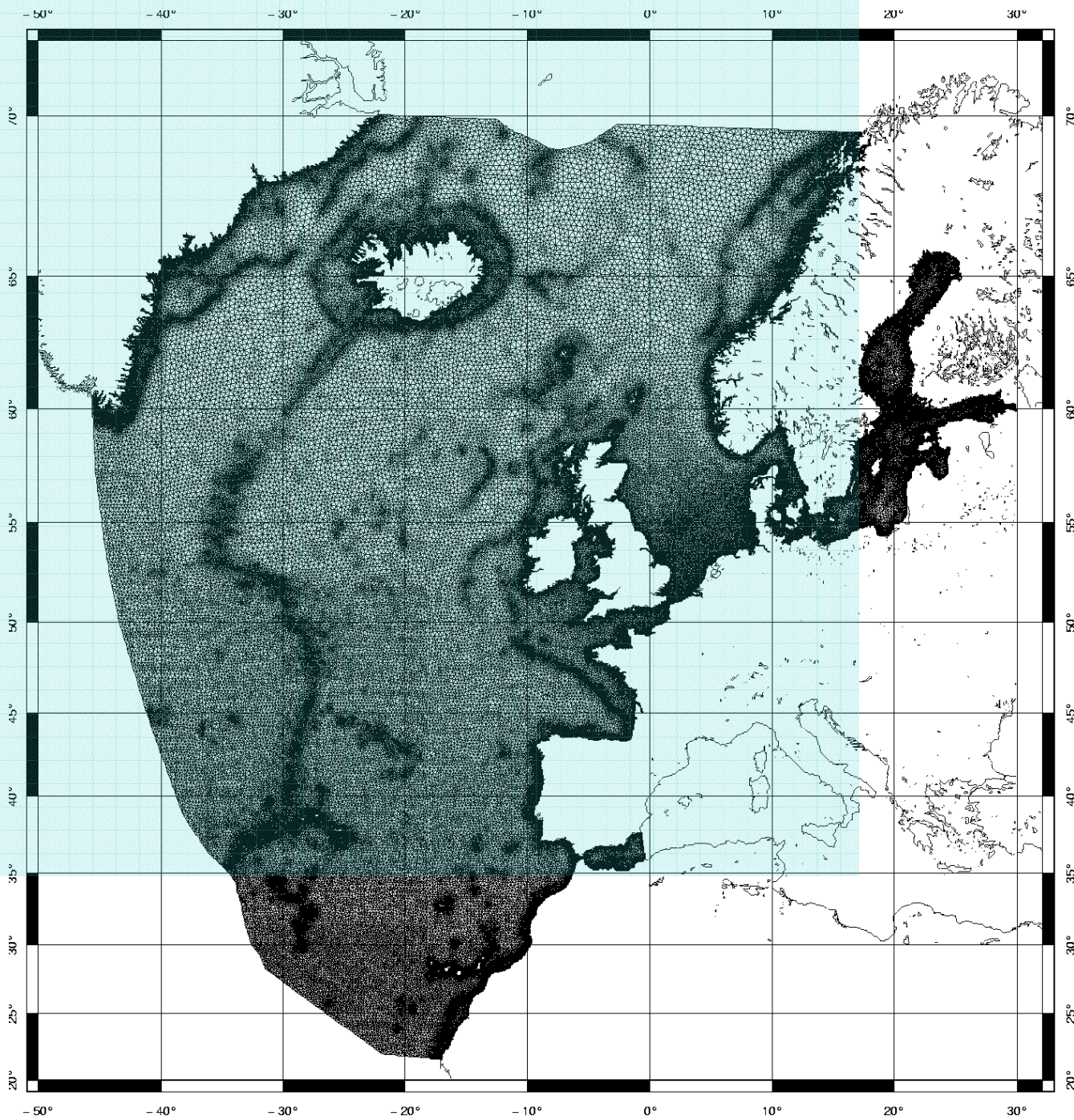
ainsi être adaptée pour mieux prendre en compte les processus dynamiques importants et leur évolution. La spécification des coordonnées verticales est également beaucoup plus flexible dans un modèle à grille non-structurée, permettant entre autres de minimiser le risque d'inconsistance hydrostatique et le besoin de dégrader, par lissage, les plus fortes pentes de la bathymétrie. S'appuyant sur les derniers progrès en matière de modélisation aux éléments et aux volumes finis, plusieurs équipes se sont engagées dans le développement de modèles à grilles non-structurées conçus pour résoudre la dynamique des bassins océaniques à celles des estuaires en passant par celle des océans de plateaux et côtiers. L'approche par les grilles non-structurées permet d'accommoder une large variété de schémas numériques, tel que les éléments finis (schémas de type Galerkin continu et Galerkin discontinu, fonctions « bulles »), les volumes finis, ainsi qu'un choix illimité dans l'ordre de ces schémas. Mieux encore, elle offre la possibilité de faire co-exister différents types de schémas et d'ordre numérique dans un seul et même modèle. La flexibilité géométrique et numérique de l'approche par les grilles non-structurées est parfaitement illustrée par les développements les plus récents comme les maillages adaptatifs et les méthodes de sub-cycling (résolution temporelle locale variable). Aujourd'hui une large palette de nouvelles techniques sont en cours de validation, aussi bien dans le domaine de la modélisation hydrodynamique directe que de l'assimilation de données. Au prix d'une complexité initiale plus grande que celle des différences finies, l'approche par les grilles non-structurées offre aux modélisateurs un éventail presque illimité de schémas numériques et par conséquent la possibilité de sélectionner ceux les mieux à même de résoudre les différents types de problèmes. Elle permet également de réduire le nombre de niveau d'emboîtement de modèles dans les problèmes où la dynamique de l'océan hauturier et celle des mers de plateau sont réunies.

L'initiative UGO (Unstructured Grid Ocean) a été élaborée en 2002 par E. Deleersnyder (UCL, Belgique), J. Pietrakz (TU Delft, NL), J. Schröter (AWI, Allemagne) et moi-même. M Iskandarani (Université de Miami, USA) est venu compléter notre comité afin de représenter la communauté nord-américaine qui s'est rapprochée très rapidement de notre action. L'initiative UGO vise à fédérer à l'échelle internationale les efforts pour le développement de modèles de nouvelle génération basés sur la discrétisation non-structurée. Un cycle d'ateliers annuels joue le rôle de forum d'échange pour les développeurs et les utilisateurs de ces modèles, afin de discuter des points critiques, de partager l'expérience acquise par les différents groupes et de favoriser leur collaboration dans le domaine du développement numérique et des applications scientifiques. Le cinquième atelier UGO s'est tenu à Miami en novembre 2006 (<http://www.rsmas.miami.edu/personal/ugom06>), le Legos ayant accueilli sa 3^{ème} édition en septembre 2004 (les travaux exposés à cette occasion ont par ailleurs fait l'objet d'une édition spéciale de « Ocean modelling » parue en 2006 et pour laquelle j'ai été éditeur invité).

La suite de ce document présente la prospective que je me suis fixé pour mes travaux futurs en modélisation de l'Océan. Afin de clairement faire apparaître le cœur de cette prospective, j'ai omis d'y développer ce qui constitue la continuation de ma participation aux activités récurrentes comme le développement de l'altimétrie pour les régions marginales, ou bien encore la modélisation globale des hautes fréquences océaniques. Non pas que je considère ces axes comme secondaires, je les considère au contraire comme stratégiques à plus d'un titre, mais ma contribution à leurs développements futurs s'inscrit dans la continuité des actions déjà réalisées, ou sera liée aux progrès du modèle T-UGOm.

2. Le modèle hydrodynamique T-UGOm

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \right) dv = \underbrace{\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dv}_1 + \underbrace{\oint_{\Gamma} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} ds}_2$$



2.1. Manifeste pour un nouveau modèle d'océan

La décision de développer un nouveau modèle hydrodynamique nécessite quelques explications. On peut en effet considérer qu'il s'agit d'une assez mauvaise idée. Le spectre de modèles déjà opérationnels est effectivement déjà très large. On sait que, parmi les nombreuses conditions requises pour l'excellence d'un modèle numérique, il y a celle d'agréger une communauté de développeurs et d'utilisateurs suffisamment nombreuse et dynamique. Par ailleurs le développement d'un nouveau modèle est un processus relativement long, qui handicape fortement et sur plusieurs années la production scientifique de ses développeurs, et dont les bénéfices sont incertains. Il s'agit d'un investissement à haut risque, et on pourrait tout à fait lui préférer un placement plus sûr en rejoignant un consortium modèle/développeurs/utilisateurs existant.

Néanmoins mon choix a été différent, il a consisté à construire un modèle entièrement nouveau, et ce pour plusieurs raisons. La première est que, au contraire des modèles aux différences finies, l'éventail de modèles basés sur les grilles non-structurées est relativement restreint et spécialisé (modèles hydrauliques plutôt qu'océaniques, comme par exemple Télémac 2D/3D). Plus contraignant encore, ces modèles ont été développés autour d'un choix de schémas numériques moulés dans la masse du modèle, et par conséquent se révèlent particulièrement difficile à faire évoluer. Leur langage de développement est le fortran, alors que le C/C++ présente beaucoup plus d'affinité avec la structure des codes aux éléments finis (le langage C++ est d'ailleurs le langage privilégié pour le développement de modèles de mécanique des fluides et des solides), tout en minimisant les problèmes de portage sur les différents types de calculateurs. Par ailleurs, l'architecture générale de ces modèles se révèle inadaptée aux besoins modernes de la modélisation, c'est-à-dire aux couplages en général et aux contraintes d'utilisation conjointe avec un code d'assimilation de données. Enfin le développement ex nihilo d'un nouveau modèle offre un certain nombre de possibilités particulièrement attractives. Il permet d'une part de reposer l'ensemble des choix classiques en modélisation dont certains ont été fait en leur temps en fonction de contraintes maintenant obsolètes ou en tout cas beaucoup moins critiques, en particulier de par l'augmentation de la puissance de calcul (scalaire et parallèle) et de l'émergence de méthodes numériques de plus en plus performantes (en particulier au niveau des solveurs linéaires tels que MUMPS, UMFPACK et GMRES). En fait il permet dans la conception du modèle à la fois de capitaliser sur l'expérience acquise au cours des décennies précédentes tout en réalisant un profond toilettage par rapport aux modèles existants. Il permet également de concevoir une architecture versatile, supportant naturellement un large éventail d'options pour les schémas numériques et la discrétisation spatiale et pouvant accueillir de façon efficace un ensemble de modules halogènes (éventuellement développés pour des modèles aux différences finies, comme par exemple la turbulence verticale, le forçage atmosphérique ainsi que des modules de bio- et géochimie ou de transport sédimentaires). Ma démarche s'inscrit dans la philosophie du développement communautaire (de type UGO et NEMO) et la situation de la place toulousaine semble idéale à cet égard grâce à la proximité des communautés OPA, HYCOM, SYMPHONIE et ROMS.

T-UGOm est basé sur les équations primitives de Navier-Stokes, non-Boussinesq (afin de conserver les effets thermo-stériques dans les simulations). Il a pour vocation de résoudre les équations dynamiques en mode hydrostatique et non-hydrostatique. Il est conçu pour être compatible avec différents types d'éléments (essentiellement prismatiques et cubiques), différents types de schémas (éléments finis continus et discontinus, volumes finis) et leurs ordres numériques. Pour se faire, la programmation orientée objet (le langage de

développement étant le C++) représente un outil privilégié. Les coordonnées verticales sont de types hybrides, avec la possibilité de fusionner les couches adjacentes internes (afin de préserver la continuité des couches de surface et de fond). Le mode externe (résolu séparément du mode interne via la technique du time-splitting) est hérité directement de MOG2D. Il est par défaut semi-implicite, et optionnellement explicite (en particuliers pour les applications avec bancs découvrants). Les bulks formula pour le forçage atmosphériques sont une adaptation des routines SYMPHONIE. Les schémas pour la turbulence verticale implantés comprennent la plupart des schémas classiques (dont TKE, k-epsilon, Gaspar et Melchior, etc...). Enfin T-UGOm est conçu afin d'être compatible avec l'utilisation de maillage auto-adaptatifs et le sub-cycling temporel (routines ré-entrantes).

En marge du développement du modèle lui-même, il est indispensable de le munir des outils qui permettront de l'employer le plus efficacement possible. Un des points critiques consistent à prescrire des conditions aux limites consistantes, et à disposer d'un moyen de contrôler le réalisme de ses simulations ainsi que leur précision. Pour cela, le code d'initialisation/forçage latéral variationnels (VIFOP) et le code d'assimilation de données (SEQUOIA) seront adaptés pour leur utilisation avec T-UGOm. Notons que pour ce qui concerne le mode barotrope, l'adaptation de SEQUOIA a déjà été réalisée et utilisée avec succès. L'approche par la méthode des ensembles a par ailleurs l'avantage de permettre une évolution significative du modèle hydrodynamique sans exiger de mises à jour lourdes du code d'assimilation (au contraire des méthodes adjointes).

Le développement d'un nouveau modèle est un pari sur l'avenir, il comporte des difficultés et des risques dont je suis pleinement conscient. J'ai cependant la conviction qu'il s'agit d'un investissement qui se montrera profitable à terme et qui me permettra de développer une recherche originale et au meilleur niveau. La clé du succès tiendra également dans ma capacité à agréger des partenaires autour de ce projet. Le recrutement en novembre 2006 d'un étudiant de thèse (Y. Le Bars) et celui en 2007 d'un ingénieur d'étude, viennent compléter les collaborations déjà existantes et qui se renforceront par le retour de N. Ayoub. T-UGOm a pour vocation d'être un modèle de circulation généraliste et complet en terme de physique. Néanmoins mon objectif est de l'appliquer en priorité aux processus pour lesquels les grilles non-structurées apportent leur plus grand bénéfices, c'est-à-dire la dynamique des régions océaniques à géométrie complexes, comme les mers de plateaux et côtières, la dynamique des ondes internes (forcée par la marée et/ou les coups de vent) et, si un partenariat sur ce thème est trouvé, les processus de convection profondes.

2.2. Situation du modèle et les futures étapes de son développement

La modélisation shallow-water (mode externe)

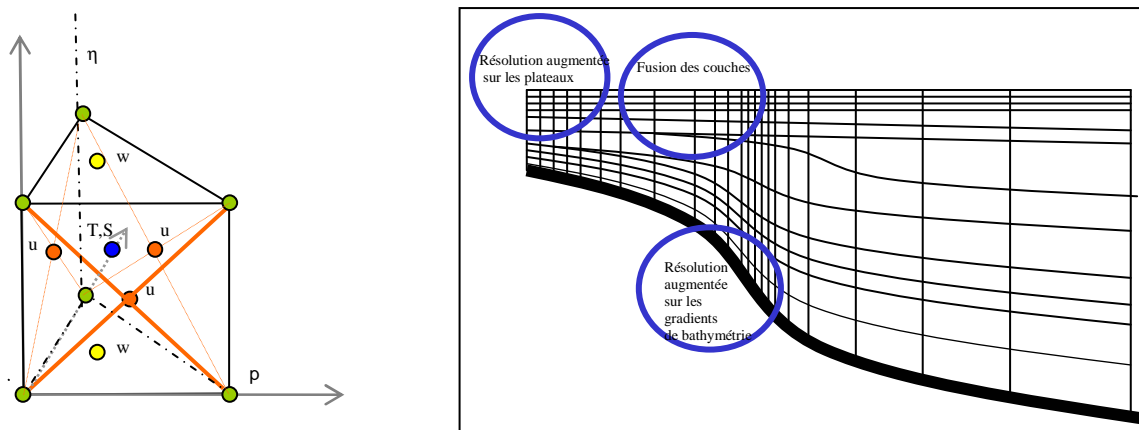
Le développement de MOG2D se poursuit dans sa version intégrée à T-UGOm. Mon objectif est de maintenir au meilleur niveau le module shallow-water du modèle afin de continuer à faire progresser la modélisation barotrope de l'Océan. Parmi les actions de développement en cours, les plus novatrices sont :

1. l'implémentation d'un mode barotrope non-hydrostatique (i.e. la pression de fond est une variable supplémentaire du modèle) afin de permettre d'améliorer les simulation de tsunami et d'écoulement dans des géométries restreintes (de type canal)

2. le couplage avec un modèle de plaque élastique afin d'améliorer les simulations de marée sous les banquises glaciaires (Amery ice-shelf) dont la bande littorale ressent les effets de contrainte liées à l'arrimage au socle rocheux côtier
3. l'implémentation d'un mode mixte permettant de traiter simultanément en mode semi-implicite les régions non-découvrantes du modèle et en mode explicite les zones découvrantes

La modélisation 3D

T-UGOm 3D est en cours de développement depuis plus d'un an maintenant, et une première version est actuellement en cours de validation. Le développement se fait selon des étapes définies au workshop UGO de Bremerhaven (octobre 2005). Il s'effectue en collaboration étroite avec mes collaborateurs canadiens ainsi que les développeurs de Symphonie (transfert de savoir-faire et de modules numériques). La documentation du code, ainsi que la description des schémas numériques et de leur discrétisation, est maintenue à jour en permanence, elle représente actuellement plus de 200 pages. L'architecture du code a été définie afin de satisfaire à l'évolution des besoins dans le domaine de la modélisation océanique et de l'intégration dans des systèmes complexes (couplages, assimilations de données, etc...), ainsi qu'aux besoins de développements communautaires en liaison avec les équipes travaillant sur ce type de techniques (groupe UGO) et plus largement l'ensemble de la communauté des modélisateurs en océanographie (HYCOM, NEMO, ROMS...).



Discrétisation T-UGOm : élément prismatique et coordonnées verticales

Schématiquement, le plan de développement de T-UGOm est le suivant :

Version 1.0 (2006)

- Eléments prismatiques (maintien de la verticalité des faces latérales), pouvant dégénérer en tétraèdre pour la fusion de couches adjacentes
- Mode externe éléments fini Lagrange P1 (élévation) P1 non-conforme (vitesse barotrope), semi-implicite (héritage direct de MOG2D)
- Eléments finis pour les vitesses horizontales (P1 non-conforme), équations conservatives, schéma type leapfrog
- Volume finis pour la vitesse verticale (quasi-P0)
- Volume finis pour les traceurs (P0), équations conservatives, schéma type leapfrog
- Approximation hydrostatique
- Diffusion/turbulence : Smagorinsky (horizontale) et coefficient de diffusion verticale constant

- Modules d'évolution de la glace de mer, traceurs lagrangiens, bulk formula etc...

Version 2.0 (2007/2008/...)

- Fusion de couches verticales
- Multi-elements (dont cubiques pour l'inter-comparaison avec les modèles aux différences finies)
- Schéma temporel Euler-backward (vitesse, traceurs)
- Solveur de pression non-hydrostatique (direct et/ou correctif)
- Librairie de schémas de turbulence (TKE, KPP, etc...)
- Adaptivité séquentielle du maillage
- Parallélisation

Il est évident que ce plan sera adapté en fonction des difficultés rencontrées et des progrès de l'état de l'art en matière de modélisation sur grille non-structurée. Il faut noter à cet égard qu'on constate depuis quelques années une maturation rapide des approches numériques, ce qui a pour conséquence une convergence des différents codes de ce type. Certes chacun conserve ses spécificités, mais cette convergence permet une osmose plus efficace des progrès dans ce domaine, et compense partiellement le problème d'une masse critique encore faible, même si cet aspect tend à s'améliorer depuis quelques années.

Des développements spécifiques

Une part importante des briques de T-UGOm, en terme de discrétisation ou de schémas, ont déjà été étudiés et sont documentés dans la littérature scientifique. Néanmoins T-UGOm comporte un certain nombre de caractéristiques peu répandues dans les modèles océaniques, comme le fait de ne pas être construit sur l'approximation dite de Boussinesq. L'équation d'onde du mode externe en est une autre. Au-delà de ces singularités, la combinaison des différentes discrétisations des composantes du vecteur d'état peut être unique, même si chacune de ces discrétisations est standard en elle-même. Ceci pose problème de la consistance de ses briques entre elles, en particulier afin d'assurer la conservation de certaines quantités, critère souvent crucial pour le réalisme d'un modèle. En conséquence, un certain nombre de développements théoriques sont nécessaires, que ce soit pour formaliser des approches originales, ou pour garantir la bonne orchestration des différentes composantes du modèle. Ce travail théorique doit aussi permettre de comprendre les différences et les analogies entre les différentes approches, entre modèles à grille non-structurées, et plus généralement avec les modèles aux différences finies. Ce dernier point est important, puisque qu'il est nécessaire de pouvoir transposer l'acquis de ces derniers vers des modèles de type T-UGOm.

3. Les chantiers d'applications

Un modèle doit être en permanence confronté à des applications réalistes, pour lesquelles des observations sont disponibles en nombre suffisant, afin de pouvoir identifier ses biais et déterminer les points critiques sur lesquels porter notre effort. Les deux chantiers principaux seront d'une part celui du plateau amazonien, et d'autre part celui de la région Atlantique Nord-est et Mer Méditerranée. Les raisons de ce choix sont brièvement exposées dans les sections suivantes.

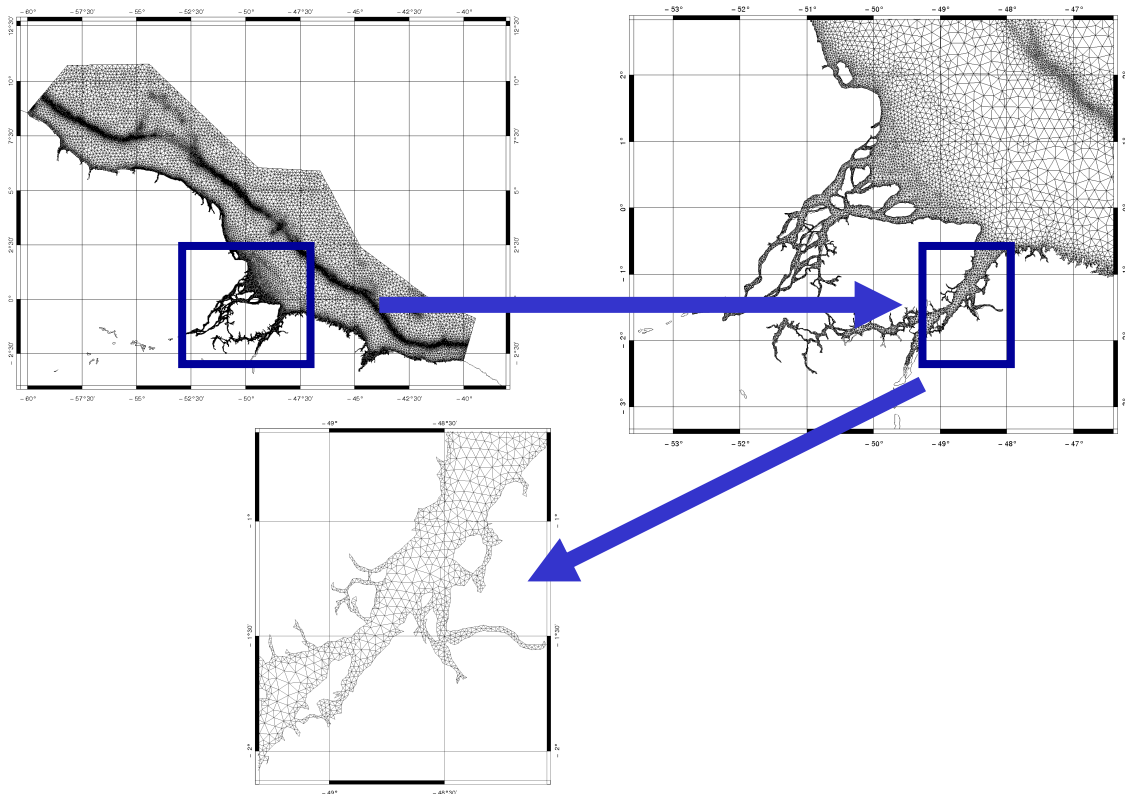
3.1. Plateau amazonien

A la frontière entre les continents et les océans, les marges continentales sont le siège de tous les apports de matière (dissoutes et solides, organiques et inorganiques) d'origine continentale vers l'océan. Elles sont aussi directement en contact avec les masses d'eau océaniques qui échangent de la matière et des éléments avec ces marges. L'érosion et le transport par les rivières étant une des sources essentielles des éléments chimiques à l'océan, la remise en suspension de matériel sédimenté et les forts mélanges d'eau favorisent les transferts de matière du continent vers l'océan. Le projet AMANDES concerne la première partie du projet FLUXANDES qui veut étudier les échanges Continent-Océan au niveau d'une marge passive (celle de l'Amazone) et d'une marge active (celle du Pérou/Chili).

Cette région de l'estuaire et du plateau continental amazonien présente un intérêt majeur pour l'ensemble des laboratoires participants au projet : Elle est caractérisée par de très forts apports continentaux qui sont relativement bien connus et suivis dans le cadre de l'ORE HyBAm (LMTG); l'Atlantique Tropical voisin est déjà étudié par les physiciens du LEGOS (Services d'Observations SSS, réseau Pirata). Les équipes impliqués souhaitent conjuguer leurs efforts pour parvenir à tracer de façon plus efficace le devenir des espèces chimiques depuis le domaine continental jusqu'au domaine océanique. Trois approches complémentaires : mesures géochimiques, mesure courantométriques, et modélisation des circulation à plusieurs échelles, incluant l'assimilation des données satellitaires, sont associées dans ce projet pour réaliser cet objectif.

La modélisation du plateau continental sera réalisée en deux étapes :

1. modélisation de la marée barotrope : le plateau amazonien est une région macro-tidale, qui présente la particularité d'avoir des natures de fond très diversifiées et même d'être traversé par des lentilles de crème de vase. La géométrie de l'estuaire, ses dimensions, la perméabilité des ses rives (formées de zones inondables), la propagation de l'onde de marée sur 500 km en amont de l'embouchure font du plateau amazonien une région hors-norme, où d'ailleurs la modélisation aux éléments fins prend tout son intérêt. La modélisation précise de la marée sur cette zone constitue un challenge majeur qui nécessitera des développements importants du modèle hydrodynamique.
2. modélisation de la circulation 3D : l'objectif, dans le cadre d'AMANDES, est de jeter les premières bases d'une modélisation réaliste de la circulation de l'estuaire et du plateau. On s'intéressera plus particulièrement à la formation du panache de l'Amazone et à son devenir, ainsi qu'au transport particulaire associé (en collaboration avec C. Estournel (LA/POC) et D. Astruc (IMFT)).



Grille du modèle T-UGOm régionale, dédié à la dynamique de la marée. L'emprise régional permet de repousser la contraintes des conditions aux limites hors de la zone de plateau étudiée. Le raffinement du maillage permet de représenter la partie intérieure de l'estuaire ainsi que le cours aval de l'Amazonie dans lequel l'onde de marée se propage sur plus de 500 km.

Le projet AMANDES comporte plusieurs campagnes in situ, auxquelles je participe évidemment. Au cours de ces campagnes (Octobre 2007, Février 2008, Juin 2008 et Octobre 2008), les 9 mouillages représentés sur la carte de la Figure 7 seront déployés. Le principal objectif du réseau de mouillage est de fournir ou de compléter les observations nécessaires au forçage latéral et à la validation du modèle hydrodynamique du plateau de l'Amazonie. En ce qui concerne les conditions aux limites, la frontière située dans l'océan hauturier sera forcée par un OGCM de type Mercator ou Drakkar. Ces modèles ne conviennent pas à la partie mer de plateau et côtière, en particulier du fait de l'absence de la marée dans leur physique et il est donc impératif de disposer d'observations aux frontières latérales du domaine de modélisation. Les deux processus prioritairement ciblé sur la zone sont d'une part la dynamique haute fréquence (zone macro tidale) et la circulation côtière, en particulier le panache de l'Amazonie à la sortie de son estuaire. Les mouillages côtiers (courantomètres et thermo-salinographes) permettront de calibrer l'influence de la circulation côtière régionale sur la dynamique locale, et donc sur le panache. Les mesures de courant permettront également de valider les courants de marée sur la zone, qui sont extrêmement corrélés localement avec la rugosité du fond, (et donc la nature des sédiments de surface). Les 3 mouillages sur le talus (ADCP de fond) ont pour but premier l'observation des courant de marée, externe et interne, à cet endroit. En effet, la marée interne est un puits d'énergie important pour la marée barotrope, et conditionne sa propagation sur le plateau. Par ailleurs, la génération d'ondes internes et leur dissipation ultérieure alimente des processus de mélange qui impacte la circulation régionale au travers de la modification de la stratification verticale. Le transit entre les points de mouillage est l'opportunité de relever (par sondeur ou multi-faisceaux) la bathymétrie du plateau et surtout du talus dont la connaissance précise est déterminante pour une bonne modélisation des ondes internes. Les observations des capteurs ADCP permettront également de suivre l'interaction

de la circulation côtière avec la circulation de talus (courant Nord-Brésil). Le déploiement de ces instruments sur une année complète permettra d'observer la variabilité saisonnière des différents processus, dont on s'attend à ce qu'elle soit significative, aussi bien à cause des variations dans le débit amazonien que dans la circulation au niveau du talus et donc de la stratification, avec entre autres les conséquences prévisibles sur les régimes d'ondes internes. Le chantier Amazone est un chantier au long cours, vu la richesse des processus qui s'y développe et la complexité de leur modélisation. Ma perspective va donc au-delà du terme du projet AMANDES, qu'il faudra poursuivre au sein dans un cadre qui reste aujourd'hui à définir.

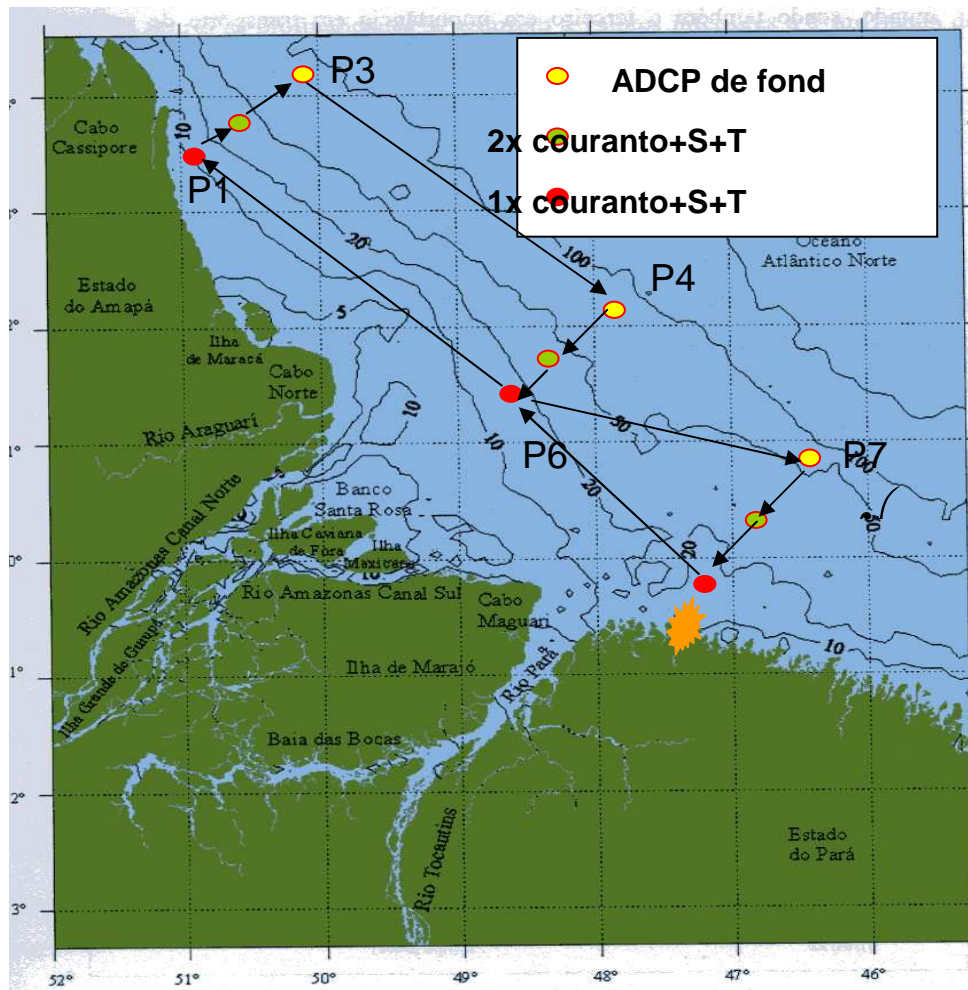


Schéma des mouillages qui seront déployés au cours des campagnes AMANDES. La première des campagnes aura lieu en Octobre 2007.

3.2. Atlantique Nord-est et Mer Méditerranée

Pour des raisons historiques et contextuelles, les chantiers Atlantique Nord-est et Mer Méditerranée restent un thème majeur de mes futurs travaux. Les trois principales motivations pour poursuivre la modélisation de ces régions sont les suivantes :

Validation de T-UGOm

Le modèle T-UGOm est appelé à évoluer rapidement dans les 2 à 3 ans à venir. A chaque étape de son développement, il est nécessaire de le soumettre à des tests de validation et d'évaluation. La comparaison avec des simulations préalablement validées, soit issues de ses versions antérieures, soit provenant d'autres modèles, constitue un moyen de quantifier les performances du modèle et la réalité de sa progression. Depuis de nombreuses années, le POC réalise des simulations de la dynamique côtière et de plateau pour les zones Atlantique Nord-est (principalement le Golfe de Gascogne) et Mer Méditerranée nord-ouest. Ce réservoir de simulations dont les caractéristiques sont bien connues constitue une source privilégiée pour ce type d'exercice, d'autant plus qu'il s'enrichit en permanence. C'est aussi l'occasion de confronter l'expertise, en terme de physique, de schémas numériques et d'optimisation des performances de calcul, de l'ensemble de la communauté de modélisateur oeuvrant sur ces régions de l'océan. Outre le POC, il faut citer la proximité de Mercator avec son modèle de façade et l'exercice d'inter-comparaison OPA-Symphonique, ainsi que la maquette HYCOM du BRESM.

Ce sont également des régions où un nombre important d'observations est disponible, ce qui est essentiel à la validation du modèle et de ses simulations. La richesse des processus qui s'y développent (courant de bord, courant de talus, marée, ondes internes, upwelling côtiers) permet de réaliser ces validations sur un spectre représentatif de la dynamique de l'Océan. Ces processus ont également la caractéristique d'être sensible aux petites échelles de la topographie, et devraient permettre de mettre en évidence l'intérêt de T-UGOm dans ce type de configuration.

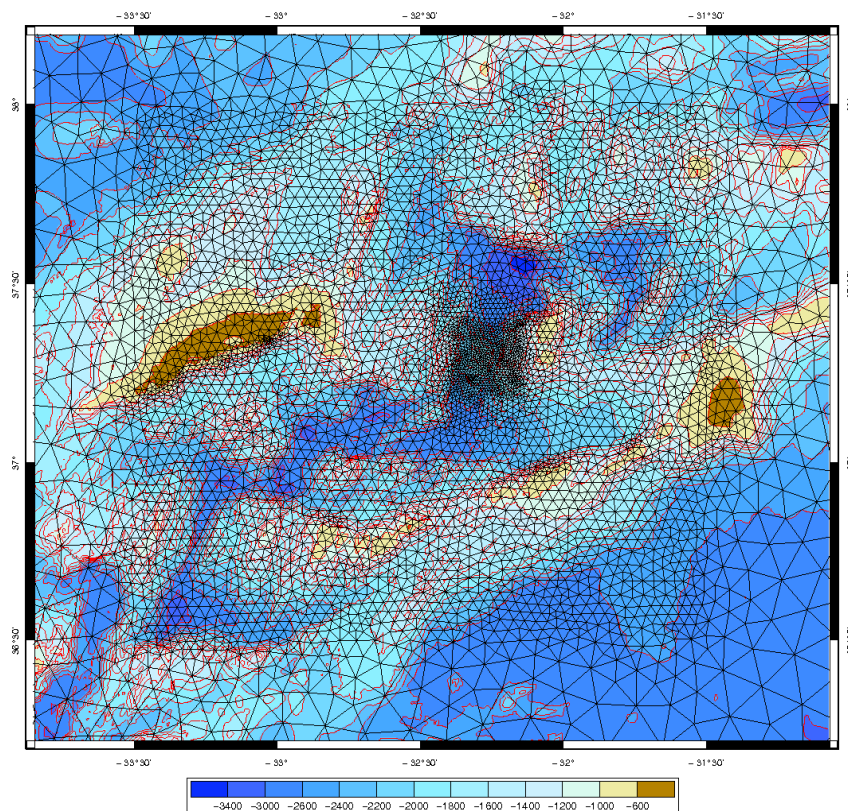
Projet européen ECOOP

Le POC a une contribution significative dans le projet européen ECOOP. Entre autres tâches, il s'est engagé au sein de ce programme d'une part à fournir des produits combinés marégraphiques et altimétriques de niveau de la mer, d'autre part de s'intéresser au problème des surcotes, en particulier dans la zone côtière. En tant que telles, ces deux tâches, bien maîtrisées au sein de l'équipe, ne nécessitent pas une contribution importante de ma part, néanmoins c'est l'occasion de s'intéresser au couplage houle et surcote dans les zones peu profondes en partenariat avec les équipes de Puertos del Estados (Espagne). En effet, dès que les fonds sont inférieurs à quelques dizaines de mètres, la houle modifie le frottement sur fond, ce qui tend à modifier localement le courant moyen. Plus critique encore, les non-linéarités de la houle entraînent la formation d'un courant littoral associé à une sur-élévation du niveau de la mer. Or on observe systématiquement dans les simulations numériques une sous-évaluation du niveau de la mer aux marégraphes dans les épisodes météorologiques forts. La contribution de la houle pourrait être une des raisons de ce défaut, avec bien sûr l'incertitude sur les champs de forçages météorologiques eux-mêmes (en particulier leur échantillonnage spatio-temporel généralement insuffisant). Il est possible d'introduire les effets de la houle dans un modèle shallow-water via un terme supplémentaire de tension déterminé à partir de mesures ou d'un modèle de houle. La technique des éléments finis permet aisément d'augmenter la résolution

de la grille jusqu'à quelques dizaines de mètres, résolution nécessaire pour décrire la bande littorale de façon réaliste. Cette étude devra permettre à la fois d'améliorer les capacités prédictives de nos modèles, en étendant leur physique aux interactions avec la houle, et d'affiner leur validation par rapport aux observations marégraphiques côtières.

Tâche de service et coopération avec les organismes opérationnels

Je suis régulièrement sollicité pour répondre à des besoins concernant la marée océanique et les surcotes. Ces demandes peuvent généralement être satisfaites à partir de produits existants (modèles globaux ou régionaux). Cependant le nombre de demandes, émanant de partenaires nationaux ou européens et exigeant un investissement plus important, reste élevé, notamment pour les zones Atlantique Nord-est et Mer Méditerranée. En absence d'autres alternatives, notre mission est, je pense, de chercher à les satisfaire. Ne disposant jusque là pas de moyens particuliers pour mener à bien cette tâche, j'ai adopté une stratégie d'évolution progressive des modèles sur ces zones afin de disposer à chaque upgrade de produits à plus haute résolution et de meilleure précision. A titre indicatif, les modèles NEA et Méditerranée en sont à leur quatrième version (les mises à jour récentes sont en relation avec le programme espagnol ESEO et ses coopérations avec Mercator). Cette stratégie est efficace à condition de maintenir une activité éventuellement réduite mais régulière sur ces zones.



Grille développée pour la campagne Graveluck, 2006 : la région centrale (lieu de la campagne) a une résolution de quelques dizaines de mètres

Ces maquettes régionales permettent de disposer des conditions aux limites requises pour des maquettes plus locales, dédiées à une étude ou une campagne in situ. C'est le cas pour le modèle Graveluck, développé spécialement pour les besoins du projet international MOMAR. Par des observations et mesures continues ou répétées, sur des échelles de temps de la minute à la dizaine d'années, l'objectif du projet MoMAR est de caractériser l'évolution temporelle de

paramètres tels que la sismicité, la déformation, l'activité volcanique, le flux, la température et la composition des fluides hydrothermaux, les flux larvaires, la diversité des micro-organismes, la variété des habitats, et la réponse des organismes à ces variations. Des simulations du modèle de marée ont été réalisées afin d'estimer précisément les courants de marée barotrope, à l'aplomb d'une topographie très accidentée, sur la zone de mesure de cette campagne (http://www.ipgp.jussieu.fr/rech/lgm/MOMAR_FR/graviluck.htm) et ainsi d'affiner la stratégie de déploiement des instruments. Cette région est le siège d'une génération intense d'ondes de marée internes et pourrait devenir, dans le cadre d'un projet LEFE-IDAO, un des chantiers de validation de T-UGOm grâce aux observations collectés.

Aujourd'hui, cette activité de service de la communauté nationale a été reconnue par la labellisation des outils numériques du Pôle d'Océanographie Côtière de Toulouse, dont T-UGOm pour la dynamique barotrope. Cette labellisation nous permet d'espérer un recrutement futur qui, en collaboration avec moi, pourra servir plus efficacement les besoins de la communauté.

Contexte national et international

Comme je l'ai indiqué précédemment, mon projet s'inscrit dans la problématique des couplages hautes et basses fréquences, côtier et large, grandes et petites échelles dynamiques qui sont une des préoccupations nationales et internationales. Au niveau national, il s'intègre évidemment au projet ANR AMANDES, et il sera coordonné avec le projet ANR TOPOGI-3D (resp. C. Staquet), le projet LEFE-IDAO Lucky-Stryke (resp. P. Bouruet-Aubertot, G. Reverdin) et l'initiative inter-organismes « Etude des Processus Océaniques Côtiers » (EPOC, resp. Y Morel) dans laquelle le Pôle d'Océanographie Côtière est fortement impliqué. Au niveau international, il rejoint l'effort de l'ensemble de la communauté pour une meilleure description dans les modèles du mélange liés aux ondes internes, et plus généralement des interactions multi-échelles, que ce soit pour l'étude de l'évolution du climat que pour l'espace côtier côtier/large. Ces préoccupations sont présentes dans les programmes européens en cours (MERSEA, MOON et plus généralement les projets relatifs au GMES) et futurs (ECOOP). L'essor du groupe UGO de modélisation aux grilles non-structurées est également la preuve de l'intérêt porté aujourd'hui aux approches de ce type, qui font chaque jour la démonstration de leur efficacité dans un nombre croissant de problèmes dynamiques, que ce soit pour l'océan hauturier ou pour les mers de plateau et côtières, ainsi que leurs interfaces. Dans la nécessité d'élargir notre représentation de l'Océan, et du puzzle complexe qui en découle, mon projet est une pièce parmi d'autres, mais qui me semble importante pour l'avenir de la recherche en océanographie.

