

Bilan du meeting modélisation
Autrans, 07-08 octobre 2008

Bernard Barnier (CNRS-LEGI)
Achim Wirth (LEGI)
Laurent Debreu (INRIA-LJK)
Eric Blayo (IMAG)
Florian Lemarie (IMAG)

Pierrick Penven (IRD, LPO)
Franck Dumas (IFREMER-DYNECO)
Valérie Garnier (IFREMER-DYNECO)

Gurvan Madec (CNRS-LOCEAN)
Rachid Benshila (CNRS-LOCEAN)

Remy Baraille (SHOM)
Yves Morel (SHOM)
Patrick Marsaleix (CNRS, LA)
Patrick Marchesiello (IRD-LEGOS)
Gildas Cambon (IRD-LEGOS)
Romain Bourdallé-Badie (MERCATOR-OCEAN)

Des participants venus de
Grenoble, Brest, Paris, Toulouse

développant dans les codes
ROMS, HYCOM, MARS, OPA, SNH(*)

(*) *Symphonie Non-Hydrostatique*

Bilan du meeting modélisation
Autrans, 07-08 octobre 2008

Faits marquants antérieurs:

Colloque Océanographie Côtière Brest 2003, GMMC Toulouse 2003

La modélisation côtière en retard ?

Pourquoi ?

La communauté trop dispersée ?

Manque d'ambition ?

Quelles solutions ?

Mercator côtier ?

Bilan du meeting modélisation
Autrans, 07-08 octobre 2008

Réunion d'Autrans:

Constat:

Océan côtier: des processus physiques plus complexes

(Physique impactée par bathymétrie, géométrie de la côte, marées, vents, fleuves, non-hydrostaticité, houles, sédiment)

La modélisation côtière à la pointe du développement
La communauté côtière française tient son rang

L'océanographie côtière en avance ?

La diversité facteur d'émulation ?

Confrontations & échanges d'idées facteur de progrès ?

Bilan du meeting modélisation
Autrans, 07-08 octobre 2008

Réunion d'Autrans:

Apport de la communauté côtière à la modélisation de l'océan hauturier?

Exemple:

Dans les années 90 les alternatives **surface libre / toit rigide** et **coordonnée sigma / coordonnée z** distinguent modèles côtiers & modèles hauturiers.

En 2009 les moyens de calcul permettent aux modèles de bassin d'inclure **marée** et **talus continentaux** et la distinction côtier/hauturier ne justifie plus le toit rigide et la coordonnée z.

Bilan du mini-meeting modélisation Autrans, 07-08 octobre 2008

17 février 2009

Ont contribué à la rédaction de ce document :

Remy Baraille (SHOM), Rachid Benshila (CNRS-LOCEAN), Laurent Debreu (INRIA-LJK), Franck Dumas (IFREMER-DYNECO), Valérie Garnier (IFREMER-DYNECO), Patrick Marchesiello (IRD-LEGOS), Gurvan Madec (CNRS-LOCEAN), Patrick Marsaleix (CNRS, LA), Yves Morel (SHOM), Pierrick Penven (IRD, LPO)

La diversité dans les applications et dans les approches

Plusieurs groupes français de modélisation effectuent des simulations réalistes de la circulation océanique. Celles-ci se basent sur des modèles performants dont le développement a nécessité un travail important. La mise en oeuvre de ces simulations et l'analyse des résultats sont indissociables d'une connaissance approfondie de la physique du problème étudié ainsi que la zone couverte par la configuration du modèle. La communauté dispose ainsi tant au niveau des connaissances que des outils d'atouts indéniables. Ceci se traduit par une forte notoriété de ces modèles, comme en témoigne leur utilisation croissante au sein de la communauté internationale. Une description succincte de ces différents modèles peut être trouvée en annexe.

Les applications effectuées couvrent un spectre très large allant de simulations paléoclimatiques avec le modèle NEMO jusqu'aux applications littorales à des résolutions de quelques mètres avec le modèle MARS3D en passant par des applications régionales et côtières avec les modèles HYCOM, ROMS et SYMPHONIE. Cette diversité des applications justifie des choix sensiblement distincts au niveau de la modélisation numérique de l'océan. Par ailleurs, les contraintes informatiques, attachées par exemple à l'utilisation d'un modèle dans un cadre recherche ou opérationnel, peuvent également conduire à des options différentes.

Cette diversité s'est déjà montrée à maintes reprises bénéfique pour l'ensemble de la communauté. Plusieurs échanges ont eu lieu entre les différents groupes sur les aspects numériques et physiques. À titre d'exemple, l'expérience d'intercomparaison de modélisation sur le golfe de Gascogne a été un exercice réussi et profitable à tous. Il est important de remarquer que la diversité joue ici un rôle essentiel dans la tâche de validation, tâche qui, avec l'augmentation du degré de réalisme des simulations, demande un investissement de plus en plus important. De plus, à l'heure où les thématiques de recherche autour des prévisions d'ensemble multi-modèles sont émergentes, disposer d'un ensemble de modèles

dont les qualités et défauts sont maîtrisés apparaît également comme un atout précieux.

Durant ces journées, l'accent a été mis sur les récentes avancées des différents groupes de recherche ainsi que sur les problèmes de modélisation qu'ils ont identifiés. Les présentations ont montré l'étendue des travaux effectués, la complexité des phénomènes étudiés et des choix de modélisation en découlant. Elles se sont révélées particulièrement enrichissantes pour l'ensemble des participants. Ces journées ont également permis de réfléchir à la façon d'utiliser au mieux cette diversité pour améliorer encore ces modèles. Ceci passe très certainement par une interaction plus forte entre les différents groupes, notamment au travers du renouvellement de ce type de rencontres. Ceci passe également par une mutualisation de certains des moyens humains disponibles en les affectant à des développements identifiés comme potentiellement utiles à l'ensemble des partenaires.

Une collaboration étendue dans la recherche et le développement

La diversité des modèles est donc une richesse que la communauté française doit faire fructifier. La création d'un modèle unique, vu comme un outil informatique communautaire, dont les développements seraient contraints à la fois par les aspects opérationnels et recherche et par un spectre large d'applications, conduirait inévitablement à la création de branches (au sens informatique) et aurait un résultat contraire à celui escompté.

Il est inévitable que cette diversité entraîne des recoupements de certaines phases de développements. Notons cependant que ceci n'est pas directement lié au nombre de modèles existants mais plus à un manque de concertation et de dialogue entre les équipes sur ces aspects. Les mêmes recoupements peuvent être présents, et le sont en pratique, dès que le développement d'un modèle est effectué par un nombre conséquent de personnes ou dès que les utilisateurs potentiels ont des applications très variées.

L'objectif premier doit donc être de favoriser les échanges entre les différents groupes de recherche. Le second objectif est de tenter d'identifier un certain nombre de phases de développements qui peuvent être mutualisés et sur lesquels des moyens humains peuvent être mis en place. Le troisième objectif est d'effectuer les développements nécessaires afin de pouvoir faciliter l'ensemble des phases d'intercomparaison de modèles.

L'ensemble des participants s'accorde pour mettre en oeuvre les moyens permettant la réussite de ces trois objectifs.

1. Encourager les échanges au sein de la communauté

C'est essentiellement grâce à des rencontres communes que pourra s'étendre la collaboration entre les différentes équipes. Des réunions, planifiées sous la forme d'un meeting annuel, permettront de discuter des nouveaux résultats scientifiques des différentes équipes et de confronter les approches. Elles seront également l'occasion de faire émerger des grands sujets de recherche pour lesquels des compétences complémentaires se trouvent au sein des équipes. Ces rencontres auront également vocation à promouvoir l'ouverture vers les disciplines proches en incitant à la présence de spécialistes (assimilation de données, météorologie, vagues, informatique ...). Ces réunions seront enfin l'occasion de faire un bilan des développements collaboratifs qui sont décrits dans les deux points suivants.

2. Mettre en commun les moyens humains pour les développements informatiques et numériques lourds et favoriser l'émergence d'un ensemble d'outils communautaires

Malgré la diversité des applications et des approches, un certain nombre de développements peuvent certainement être effectués de manière communautaire. Ceci concerne principalement les différentes briques d'un modèle n'impactant pas ou peu les choix fondamentaux de la modélisation ou pour lesquelles un consensus peut être adopté. Il s'agit ici de s'appuyer sur l'expérience acquise dans les équipes pour favoriser la circulation des outils et mieux coordonner leur développement. Certains de ces développements et outils collaboratifs ont déjà été identifiés au cours de cette première réunion (procédures d'interpolation, solveurs elliptiques, formules BULK, **AGRIE, ROMSTOOLS, VIEOP**)

La mise en commun d'une partie de ces outils sera facilitée par l'adoption d'un standard dans les formats de fichiers d'entrées et de sortie. Ce standard permettra aussi de faciliter la mise en place d'éléments d'intercomparaison.

Un site de travail collaboratif, de type Forge, sera mis en place pour harmoniser cette démarche.

3. Mettre en place les éléments permettant l'intercomparaison des modèles

Une source importante d'amélioration des modèles réside dans leur intercomparaison. Cette intercomparaison passera d'une part par la création de cas tests idéalisés ou réalistes concentrés sur l'étude d'un aspect particulier de la modélisation. La conception de ces cas tests, parfaitement documentés, doit également permettre une entrée plus aisée de chercheurs d'autres disciplines (notamment de mathématiciens appliqués) dans la modélisation numérique. Elle permettra en outre de confronter les modèles actuels à des approches différentes, basées par exemple sur des méthodes spectrales ou lagrangiennes.

L'adoption d'un standard dans les formats de fichiers, évoquée plus haut, permettra l'utilisation d'outils diagnostiques communs apportant ainsi des éléments de validation importants. Elle devrait également rendre possible à terme une mise en œuvre simplifiée de simulations multi-modèles.

Notons enfin que l'ensemble de ces éléments conduiront à une mise en œuvre simplifiée de couplage, passif ou actif, de ces différents modèles.

Il est raisonnable de penser qu'une fois ce mode de fonctionnement mis en place, il deviendra le plus pertinent. Il doit conduire à la construction d'un système de modélisation commun aux différents groupes de recherche. Chaque élément du système, issu d'une interaction forte entre les différents groupes, aura bénéficié des compétences de l'ensemble de la communauté. Les éléments d'intercomparaison donneront à l'utilisateur potentiel les clés lui permettant de choisir à l'intérieur de ce système le moteur le plus approprié pour ses objectifs scientifiques.

Bien entendu, ce sont les recherches propres à chaque groupe qui viendront alimenter ce travail collaboratif. Elles devront donc continuer à être soutenues prioritairement.

A Principales caractéristiques des modèles de la communauté

• HYCOM

HYCOM (<http://hycom.rsmas.miami.edu/>) est un modèle communautaire libre développé initialement aux USA, sur la base du code en coordonnées isopycnales MICOM. Le code HYCOM est utilisé en France principalement par le SHOM. Le LEGI l'a aussi utilisé dans des études d'assimilation de données, le LPO l'utilise depuis 2005 pour la modélisation réaliste de l'océan Indien Nord-Ouest en coopération avec le SHOM. Le code MICOM est utilisé lors d'études de processus en version simplifiée adiabatique par plusieurs laboratoires nationaux notamment dans le cadre de thèses.

La communauté internationale d'utilisateurs compte plusieurs centaines de membres, principalement situés aux USA. La Norvège (NERSC), la GB (SOC) sont aussi d'importants contributeurs au consortium HYCOM. Les utilisations vont de la recherche jusqu'aux systèmes opérationnels globaux ou régionaux à hautes résolutions (le NRL met en ligne les résultats d'un système global au 1/12° et teste actuellement une version de HYCOM globale au 1/25°), aux applications régionales et locales dans le cadre de projets de recherche et développement. La communauté des développeurs du code est bien sur plus réduite, mais compte une dizaine de personnes (USA, Norvège et France essentiellement). Des meetings rassemblant le consortium ont lieu tous les 18 mois.

HYCOM est un code aux volumes finis assez classique pour les schémas horizontaux, utilisant des schémas conservatifs par couche (cette propriété est d'intérêt quand les couches sont isopycnales car elle correspond à une propriété physique) pour les traceurs et conservant énergie et entropie pour les équations dynamiques. Les modèles de fermeture disponibles sont variés (Mellor Yamada, Krauss-Turner, KPP, GIS, ...). Il existe plusieurs modèles de glace de mer couplés au modèle HYCOM ainsi que des modèles biochimiques. Il existe aussi plusieurs systèmes d'assimilation de données associés au code.

La différence principale de HYCOM avec les autres codes est liée à l'utilisation d'une coordonnée verticale variable dans le temps : à chaque pas de temps, celle-ci peut être redéfinie en suivant des règles dictées par avance (les niveaux verticaux ne pouvant toutefois pas se croiser). L'utilisation de la coordonnée hybride ajoute un degré de liberté intéressant mais a un coût (difficile à évaluer par rapport aux modèles en z ou sigma, sans doute de l'ordre 10-20 %). Les règles d'hybridation sont donc à définir avec soin pour rentabiliser ce coût. Dans la pratique, la coordonnée verticale isopycnale est utilisée sous la couche de mélange, la coordonnée z dans les couches de surface, sauf en zone côtière où elle évolue vers une coordonnée sigma. La coordonnée isopycnale permet de répartir la discrétisation verticale dans les zones de variation de la densité, à tous les instants ; elle est en particulier d'intérêt pour les processus géostrophiques (circulation océanique, dynamique à meso-échelle), pour les courants de gravité, pour les ondes internes, voire pour la dynamique de la couche de mélange (elle permet de conserver des thermoclines d'épaisseur très faible, mais la partie supérieure -non stratifiée- de la couche de mélange doit toutefois être discrétisée en z pour pouvoir utiliser des modèles de fermeture sophistiqués).

Les schémas temporels sont classiques (leapfrog) avec certaines particularités sur le splitting barotrope/barocline.

• MARS

MARS est un modèle développé par l'équipe DYNECO/PHYSED de l'IFREMER et dédié à l'océanographie côtière des échelles régionales jusqu'aux échelles littorales (quelques

kilomètres). Il intègre une composante environnementale forte (sédimentologie et biogéochimie). Dans le cadre de DYNECO, il est principalement employé pour la modélisation régionale des façades maritimes métropolitaines. Il est déployé à l'intérieur de l'Institut dans les laboratoires environnement ressources (6 stations, une trentaine de configurations). Il est l'un des deux modèles utilisés dans le système dédié à l'environnement côtier PREVIMER.

MARS est utilisé en France et à l'étranger par différents organismes de recherche (communauté d'une centaine d'utilisateurs) pour des besoins spécifiques :

- SHOM : interaction vagues courants, dynamique des couches superficielles,
- BRGM, UMR EPOC : hydrodynamique littorale et morphodynamique associée,
- IRD : hydrodynamique lagunaire (Nouméa, Tuamutu),
- INA, IMFIA, CIMA (Argentine) : hydrodynamique estuarienne et application au transport des sédiments fins.

Au niveau numérique, son originalité est le traitement du mode barotrope dans le mode splitting qui est évalué de façon semi-implicite évitant ainsi un time-splitting et permettant un couplage plus direct entre le mode barotrope et le mode barocline.

• NEMO

Il s'agit d'une plate-forme de modélisation numérique de l'océan (dynamique et biogéochimie) et de la glace de mer.

Initialement OPA, son développement a été initié au LODYC, poursuivi ensuite dans la communauté française et labellisé par l'INSU. Il est désormais structuré par un accord de consortium européen impliquant le CNRS, Mercator-Ocean, le UKMO et le NOCS.

Il compte environ 300 utilisateurs pour une quarantaine de projets, aussi bien :

- en mode recherche pour l'océanographie en France et en Europe (ex projet Drakkar)
- comme composante océanique des modèles de climat : c'est celle de la grande majorité des modèles européens pour le prochain exercice IPCC
- en océanographie opérationnelle (Mercator, UKMO, DFO Canada, INGV) et en prévision saisonnière (ECMWF, Météo-France)

• ROMS

Le système de modélisation océanique régional (ROMS) est un modèle de circulation océanique conçu pour la simulation précise des systèmes océaniques régionaux et les marges côtières. ROMS appartient à une hiérarchie de modèles d'océan à coordonnée verticale suivant la topographie démarrée à l'Université de Rutgers par SPEM et SCRUM. Plusieurs développements ont été effectués à l'université de Californie à Los Angeles pour la simulation efficace et précise de la dynamique côtière à haute résolution : paramétrisations sous-mailles innovantes, schémas spatiaux et temporels d'ordres élevés et optimisation pour les architectures vectorielles et parallèles. L'IRD conjointement avec l'INRIA maintient une branche séparée du modèle (ROMS_AGRIF) qui comporte un système d'emboîtement de grilles multi-niveaux et une structure modifiée pour pouvoir l'employer simplement avec ses différents modules applicatifs (biogéochimie, sédiment, halieutique, flotteurs dérivants). La conjonction d'un modèle stable, précis et efficace avec des conditions de frontières ouvertes robustes permet de suivre désormais une approche systématique pour obtenir une configuration régionale standard. Dans ce contexte, une série de routines MATLAB et plusieurs bases de données ont été rassemblées dans une boîte à outils intégrée : ROMSTOOLS. ROMSTOOLS exige seulement un minimum d'informations pour obtenir une simulation pour presque toutes les régions du monde. ROMSTOOLS et ROMS_AGRIF ont été appliqués avec succès dans différentes études régionales. A ce jour, 580 utilisateurs de 59 différents pays se sont inscrits sur la page

web de ROMSTOOLS/ROMS_AGRIF (<http://roms.mpl.ird.fr/>)

• SYMPHONIE

Symphonie est un modèle océanique développé par le pôle d'océanographie côtière de l'observatoire midi-pyrénées de toulouse. SYMPHONIE fait partie du système SIROCCO¹ labellisé modèle communautaire par l'Insu en 2007. Ses principales caractéristiques sont la surface libre, la coordonnée verticale généralisée, l'option non-hydrostatique et une méthode numérique permettant la conservation de l'énergie. Symphonie est couplé avec un modèle biogéochimique et de transport sédimentaire.

¹SIROCCO Simulations réalistes de l'océan côtier

Open boundary conditions for internal gravity wave modelling using polarisation relations

Patrick Marsaleix; Caroline Ulses; Ivane Pairaud; Marine Julie Herrmann;
Jochem Willem Floor; Claude Estournel; Francis Auclair

Ocean Modelling 2009

Spécificités du Golfe de Gascogne:

Importance de la marée externe et
des ondes de gravité internes

Conditions aux limites:

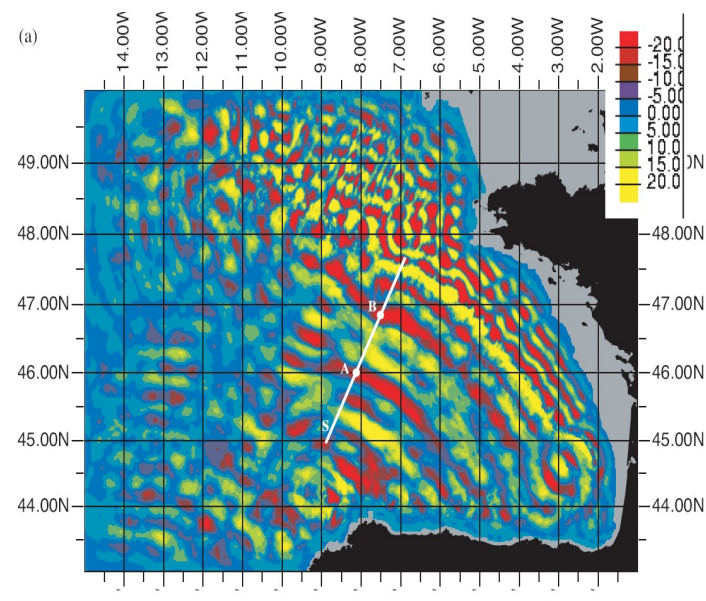
Absorbantes?
Radiatives?
Mixtes?

Martinsen and Engedahl, 1987

Flather, 1976

Marchesiello et al., 2001

D'après Pichon & Correard, 2006



La condition PRM(*) variante 3D généralisée de la condition de Flather

(*)Polarisation Relation Method

$$u = \frac{k\omega + ilf}{\omega^2 - f^2} \frac{p}{\rho_0} \quad v = \frac{l\omega - ikf}{\omega^2 - f^2} \frac{p}{\rho_0} \quad (\text{Gill, 1982, p263, Eq. 8.5.3})$$

$$\tilde{p}(x, y, t) = p_0 \cos(kx + ly - \omega t)$$

$$\tilde{u} = \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{k\omega}{\omega^2 - f^2} \cos(kx + ly - \omega t) - \frac{lf}{\omega^2 - f^2} \sin(kx + ly - \omega t) \right)$$

$$\tilde{v} = \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{l\omega}{\omega^2 - f^2} \cos(kx + ly - \omega t) + \frac{kf}{\omega^2 - f^2} \sin(kx + ly - \omega t) \right)$$

Dans le cas simple d'une propagation perpendiculaire à la frontière ouverte ($l = 0$) et à haute fréquence ($\omega \gg f$) une relation simple pour p et u peut être déduite.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$v = 0$$

$p = + \rho_0 c u \quad x = x_2 \quad c = \omega / k$ $p = - \rho_0 c u \quad x = x_1 \quad x_2 > x_1$
--

La condition PRM(*) variante 3D généralisée de la condition de Flather

(*)Polarisation Relation Method

Pourquoi une condition de Flather ? : **une condition robuste**

$$\begin{array}{l} p = + \rho_0 c u \quad x = x_2 \\ p = - \rho_0 c u \quad x = x_1 \quad x_2 > x_1 \end{array}$$

Bilan du flux d'énergie potentielle aux frontières:

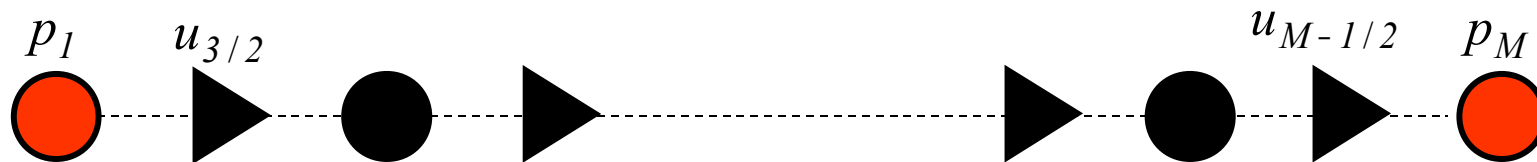
$$-\frac{pu}{\rho_0} \Big|_{x=x_2} + \frac{pu}{\rho_0} \Big|_{x=x_1} = -cu^2 \Big|_{x=x_2} - cu^2 \Big|_{x=x_1} < \underline{0}$$

La condition de Flather empêche l'accumulation d'énergie aux frontières

Pourquoi une condition de Flather ? : **une condition robuste**
... si forme discrète réussie

Forme discrète du flux d'énergie potentielle aux frontières:

$$- \frac{p_M u_{M-1/2} - p_1 u_{3/2}}{\rho_0}$$



La forme discrète du bilan d'énergie suggère de faire porter la condition aux limites sur la pression...

Forme numérique de la condition aux limites:

$$p_M = \rho_0 c u_{M-1/2}$$

$$p_1 = -\rho_0 c u_{3/2}$$

$$- \frac{pu}{\rho_0} \Big|_{x=x_2} + \frac{pu}{\rho_0} \Big|_{x=x_1} = -c u_{M-1/2}^2 - c u_{3/2}^2 < 0$$

Pourquoi une condition de Flather ? : **une condition robuste**
... si forme discrète réussie
en particulier le schéma temporel

Forme discrète de l'énergie cinétique & schéma Leap-Frog (*) : $E = \frac{1}{2} u^{t-\Delta t} u^t$

(*) Marsaleix et al., 2008. Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models. *Ocean Modelling*.

L'énergie cinétique discrète est négative aux grandes fréquences (notamment bruit)

Forme discrète de la condition limite:

$$p_M^t = \rho_0 c u_{M-1/2}^{t-\Delta t}$$

$$p_1^t = -\rho_0 c u_{3/2}^{t-\Delta t}$$

Forme discrète du bilan de flux d'énergie potentielle aux frontières:

$$-\frac{p_M u_{M-1/2} - p_1 u_{3/2}}{\rho_0} = -c u_{M-1/2}^{t-\Delta t} u_{M-1/2}^t - c u_{3/2}^{t-\Delta t} u_{3/2}^t$$

Le flux d'énergie potentielle aux frontières est négatif aux basses fréquences (comme attendu) mais devient positif aux hautes fréquences (effet « anti-bruit »)

Pourquoi une condition de Flather ? : **une condition naturellement multidirectionnelle...**

... si l'effet de la rotation de la terre est négligeable (hautes fréquences)

...le courant est dans l'axe de propagation (ellipse de courant « plate »)

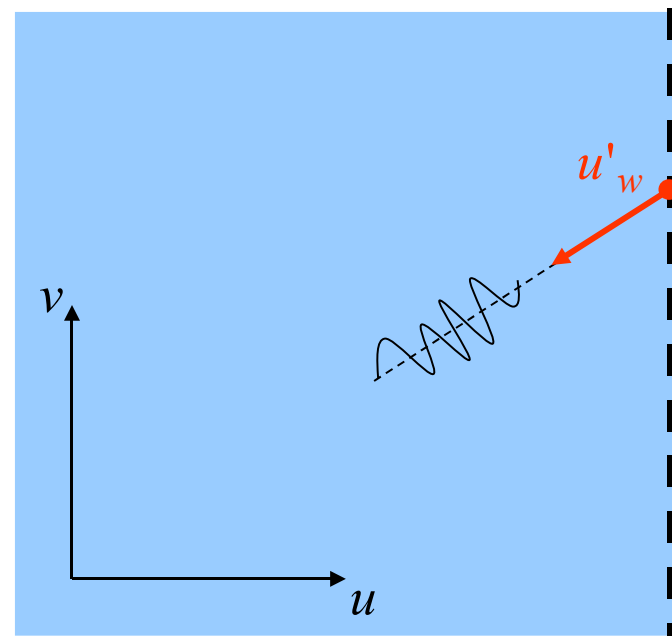
$$u_w = \text{sign}(u) \sqrt{u^2 + v^2} = u \sqrt{1 + (v/u)^2}$$

...détails dans Marsaleix et al, 2009

$$p(x, y, t) = p_0 \cos(kx + ly - \omega t) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$u = \frac{p_0}{\rho_0} (k \cos(kx + ly - \omega t)) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$v = \frac{p_0}{\rho_0} (l \cos(kx + ly - \omega t))$$



$$p = + \rho_0 c u_w$$

hautes fréquences

La spécificité 3D: structures cohérentes (modes de propagation baroclines) & vitesses de phase (constantes) associées.

Identification par la résolution du problème de Sturm-Liouville (Gill 1982):

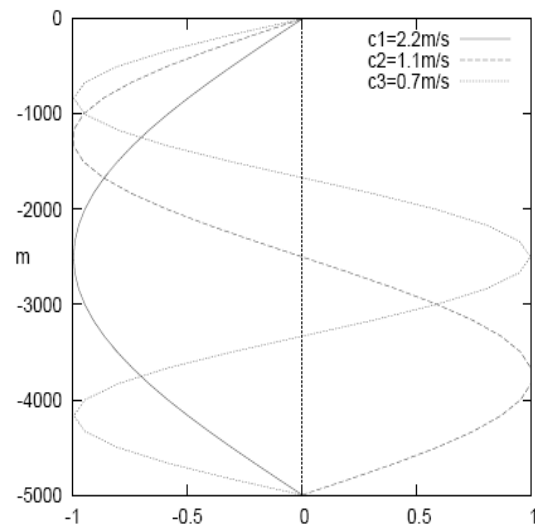
$$\frac{d^2 \hat{w}}{dz^2} + \frac{N^2}{c_e^2} \hat{w} = 0$$

à partir de la stratification ambiante: $N = \left(-g \rho_0^{-1} d\rho / dz \right)^{0.5}$

Modes de propagation en vitesse et pression: $\hat{u}_q(z) = \hat{p}_q(z) = d\hat{w}_q / dz$

Décomposition du courant selon « n » modes de propagation: $u(x, z, t) = \sum_{q=1, n} \left[\hat{u}_q(z) \tilde{u}_q(x, t) \right] + \varepsilon$

$$\tilde{u}_q(x, t) = \left(\int_{-h}^0 \hat{u}_q^2(z) dz \right)^{-1} \times \int_{-h}^0 \hat{u}_q(z) u'(x, z, t) dz$$



Recomposition de l'anomalie de pression à la frontière ouverte: $p = \pm \sum_{q=1, n} \rho_0 c_q \hat{u}_q \tilde{u}_q$

Fréquences proches de la fréquence inertielle

Deux difficultés liées à l'effet Coriolis:

1. L'approche modale est, dans une certaine mesure, prise en défaut lorsque la fréquence devient proche de la période inertielle car la vitesse de phase devient dépendante de la fréquence:

$$\omega^2 \ll N^2$$

$$c = c_e \left(1 - f^2 / \omega^2\right)^{-1/2}$$

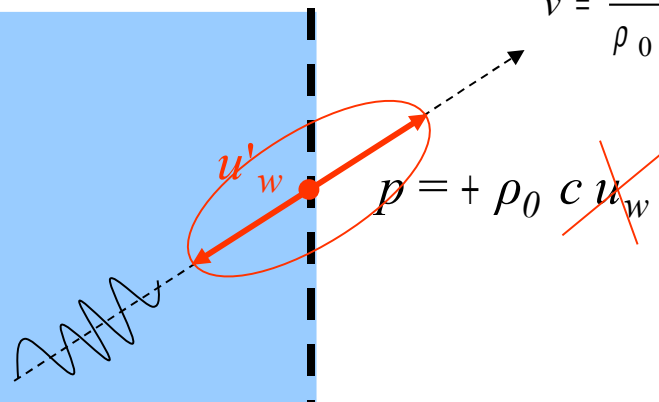
$$\tilde{p}(x, y, t) = p_0 \cos(kx + ly - \omega t)$$

$$\tilde{u} = \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{k\omega}{\omega^2 - f^2} \cos(kx + ly - \omega t) - \frac{lf}{\omega^2 - f^2} \sin(kx + ly - \omega t) \right)$$

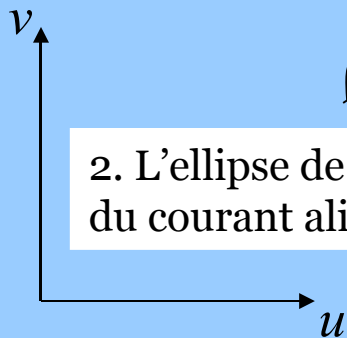
$$\tilde{v} = \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{l\omega}{\omega^2 - f^2} \cos(kx + ly - \omega t) + \frac{kf}{\omega^2 - f^2} \sin(kx + ly - \omega t) \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$



2. L'ellipse de courant n'est plus « plate » et la pression n'est plus corrélée à la composante du courant alignée sur l'axe de propagation:



Difficultés liées à l'effet Coriolis: des solutions sont possibles.

1. Vitesse de phase: soit la fréquence est connue à priori (ex: ondes M2) soit elle est déduite de la solution intérieure:

$$\omega^2 = - \frac{\partial^2 u / \partial t^2}{u} = - \frac{\partial^2 v / \partial t^2}{v} \quad (\text{Forme discrète robuste proposée dans Marsaleix et al, 2009})$$

2. Définition de pseudo-vitesse oscillant dans une ellipse « plate »:

$$u^* = u - f \int_{t_0}^t v dt' \quad v^* = v + f \int_{t_0}^t u dt' \quad \frac{\partial u^*}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$

Permet de généraliser la condition aux limites multidirectionnelle au cas de la rotation:

$$p = \pm \rho_0 c u^* \sqrt{1 + (v^*/u^*)^2}$$

Modélisation Non-Hydrostatique

Francis Auclair

SYMPHONIE
Hydrostatique

fréquences d

Équations
générales

SNH

Symphonie
- NH

$$\omega = 0$$



$$p = p_H = p_{atm} + \rho g(\eta - z)$$

$$\frac{\partial Dv_\alpha}{\partial t} = - \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial p_H}{\partial x_\alpha} \Big|_z + \xi_\alpha$$

$$\omega \equiv D \frac{d\sigma}{dt}$$

$$\frac{\partial Dv_\alpha}{\partial x_\alpha} \Big|_\sigma + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

$$\omega = 0$$

$$v_z(\eta) = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + v_\alpha(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha}$$

p

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_\alpha}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_\alpha} \Big|_z + \xi_\alpha \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \xi_z \end{array} \right.$$

$$\frac{\partial v_\alpha}{\partial x_\alpha} \Big|_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$v_z(-H) = - \frac{dH}{dt} = - v_\alpha(-H) \frac{\partial H}{\partial x_\alpha}$$

Cinéma.

Pression

Mouvement

Continuité

Cinéma.

$$v_z(\eta) = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + v_\alpha(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha}$$

$$p = p_H + q$$

$$\frac{\partial Dv_\alpha}{\partial t} = - \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial p_H}{\partial x_\alpha} \Big|_z - \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} \Big|_z + \xi_\alpha$$

$$\frac{\partial Dv_z}{\partial t} = - \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \xi_z$$

$$\frac{\partial Dv_\alpha}{\partial x_\alpha} \Big|_\sigma - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_\alpha \frac{\partial z}{\partial x_\alpha} \Big|_\sigma \right) + \frac{\partial v_z}{\partial \sigma} = 0$$

$$v_z(-H) = - \frac{dH}{dt} = - v_\alpha(-H) \frac{\partial H}{\partial x_\alpha}$$

Symphonie - NH

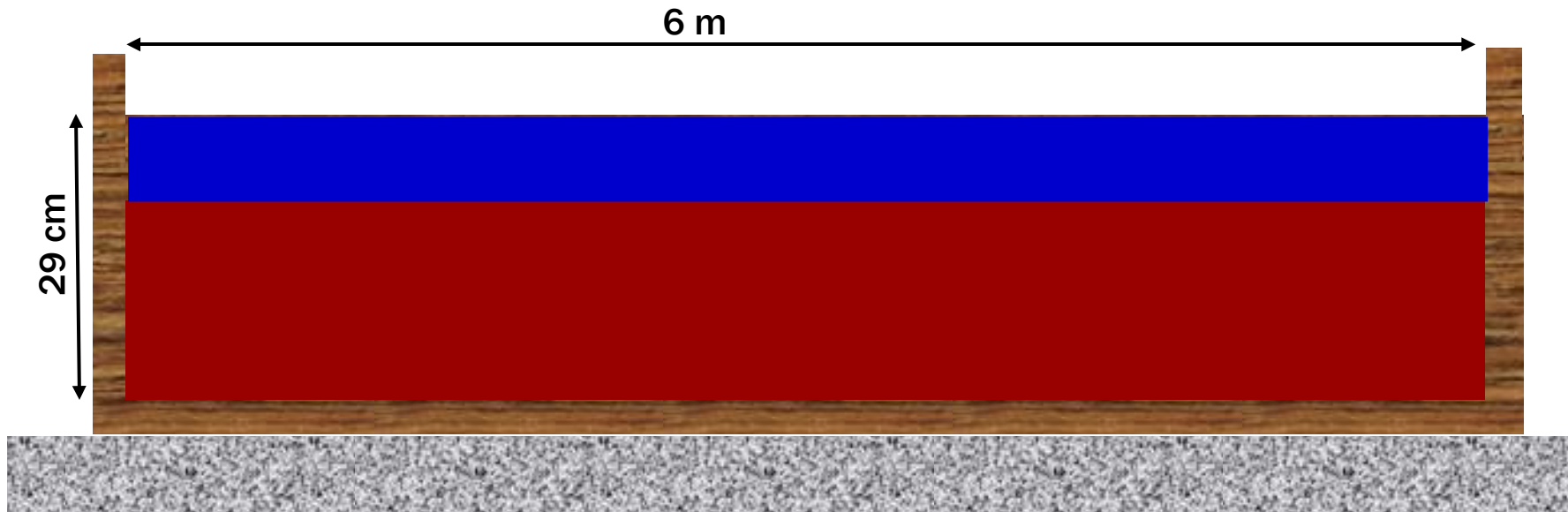
fréquences dans SNH

Processus interfaciaux:
solitons, solibores...

Oscillations libres d'une cuve contenant 2
liquides de masses volumiques différentes

Expérience de Horn et al., 2001

$$\begin{cases} h/H = 0,3 \\ \zeta_0/h = 0,3 \end{cases}$$



- Bassine : 10 m x 10 m,
- N : 0,73 Hz.

Symphonie - NH

Processus interfaciaux:
solitons, solibores...

Oscillations libres d'une cuve contenant 2
liquides de masses volumiques différentes

Évolution de la masse volumique

SNH

(durée: 5 mn)



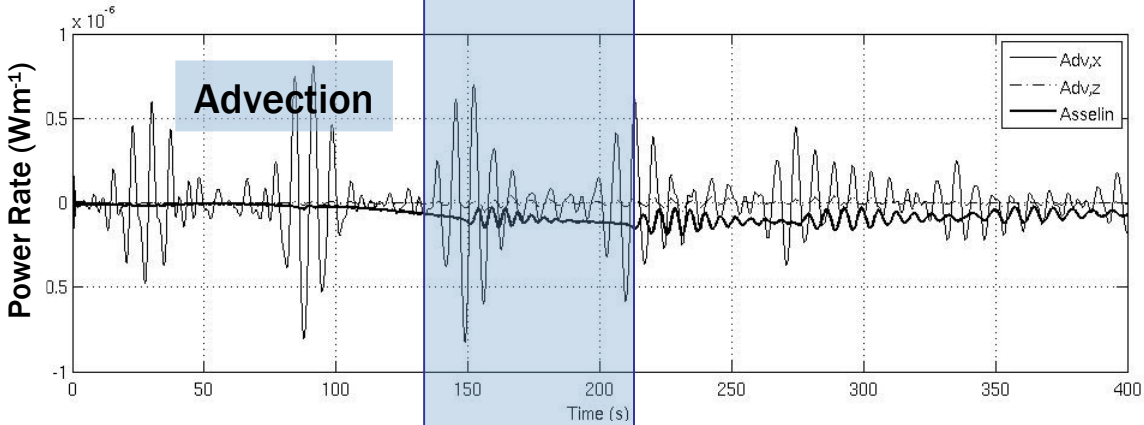
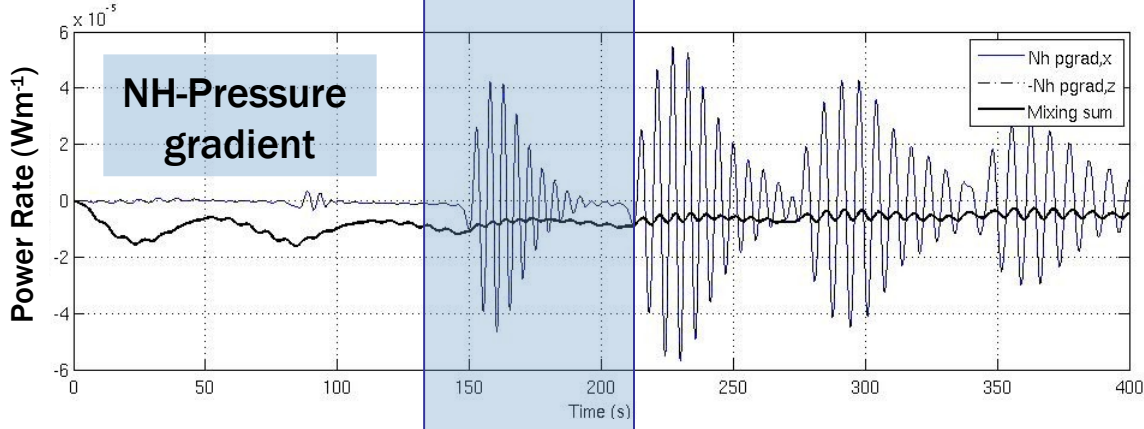
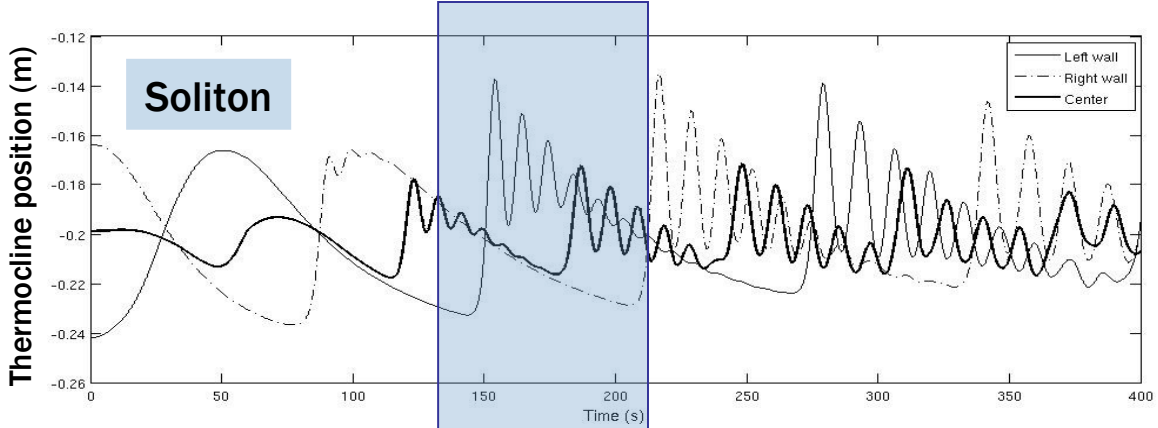
SNH en mode
Hydrostatique

$$\begin{cases} h / H = 0,3 \\ \zeta_0 / h = 0,3 \end{cases}$$



Distance (m)

Analyse énergétique

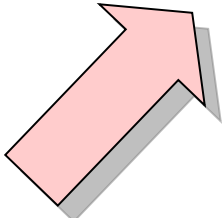


Processus très hautes fréquences dans SNH

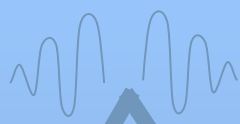
Transferts énergétiques

Expériences en cuve,
Modélisation directe

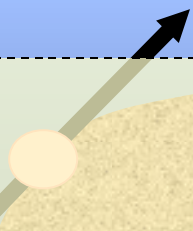
Configurations océaniques



Interaction avec thermocline / pycnocline



Génération sur talus



Génération sur monts, Dorsales, seuils.



Mélange

- Propagation:
- Réflexion,
 - Dispersion...

