

Deuxième rapport trimestriel à Mercator-Océan

Guillaume Riflet
MARETEC IST

24 janvier 2007

Table des matières

1	Préambule	2
2	Système pré-opérationnel	4
2.1	Traitement des données d'entrée	13
2.2	Mise en route du modèle	13
2.3	Traitement des données de sortie	18
2.4	Publication des résultats	18
2.5	Validation des résultats	19
3	Modélisation de l'hydrodynamique de la côte Portugaise	23
3.1	Forçage atmosphérique	25
3.2	Forçage océanique	26
3.2.1	Au fond	26
3.2.2	Aux frontières latérales terrestres	27
3.2.3	Aux frontières ouvertes	27
3.3	Modèle barotrope	28
3.4	Modèle de la côte Portugaise	30
3.5	Modèle de l'Estrémadure	31
4	Résultats	34
5	Conclusions	46

Chapitre 1

Préambule

Au cours de ce deuxième trimestre, plusieurs étapes furent franchies ; nommément les premiers résultats du modèle MOHID. Ne commençant qu'avec le forçage de la marée (FES2004[24]) et de l'hydrodynamique de la large échelle (Mercator), bientôt, le système aura évolué, comportant actuellement un forçage atmosphérique (vents, radiation, chaleur latente, chaleur sensible, température à la surface, évaporation, précipitation et pression atmosphérique). Enfin, un système de publication des résultats fût monté, bien qu'il ne soit encore qu'à l'expérience.

Nous tenons à signaler la gentillesse du professeur J. J. Delgado Domingos qui accepta de nous fournir des résultats de prévisions météorologiques sur 7 jours, et ce de façon hebdomadaire. Le groupe du professeur J. J. Delgado Domingos, voisin du groupe MARETEC à l'IST, tourne un modèle de prévision météorologique opérationnellement ¹. Les prévisions fournies commencèrent la semaine du 22 novembre et sont prévues de s'étendre sur la période établie dans le contrat dont ce rapport est objet.

Nous rappelons qu'un contrat fut signé entre l'IST et Mercator-Océan comme quoi Mercator-Océan céderait des extraits hebdomadaires du Modèle opérationnel PSY2v2r1 (avec une résolution horizontale de 0.05°). Il est convenable de signaler que, depuis la semaine du 6 septembre 2006, les prévisions fournies, jadis s'étendant sur 11 jours, auront passé à 14 jours.

L'IST se serait engagé à se servir de cette solution en tant que condition aux frontières d'un modèle opérationnel côtier et à faire part de ses résultats à Mercator [33].

Ce texte est un rapport visant à décrire le travail fait par l'IST au cours des deux premiers trimestres du contrat, sur la période allant de la mi-juin à

¹<http://meteo.ist.utl.pt/>

la mi-décembre. Lors du dernier rapport [33], le plan du modèle opérationnel fut énoncé. Dans ce deuxième rapport seront énoncés "l'état des lieux" du modèle pré-opérationnel ainsi que les changements structurels ou particuliers du plan. Vu l'évolution, Il n'est pas surprenant, du coup, que la structure de ce rapport soit différente du précédent [33]. Enfin, nous avons opté de remplacer l'attribution du mot "procés" à son concept associé par un mot homonyme, "processus", qui est plus indiqué selon la description faite dans atilf ².

²<http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>

Chapitre 2

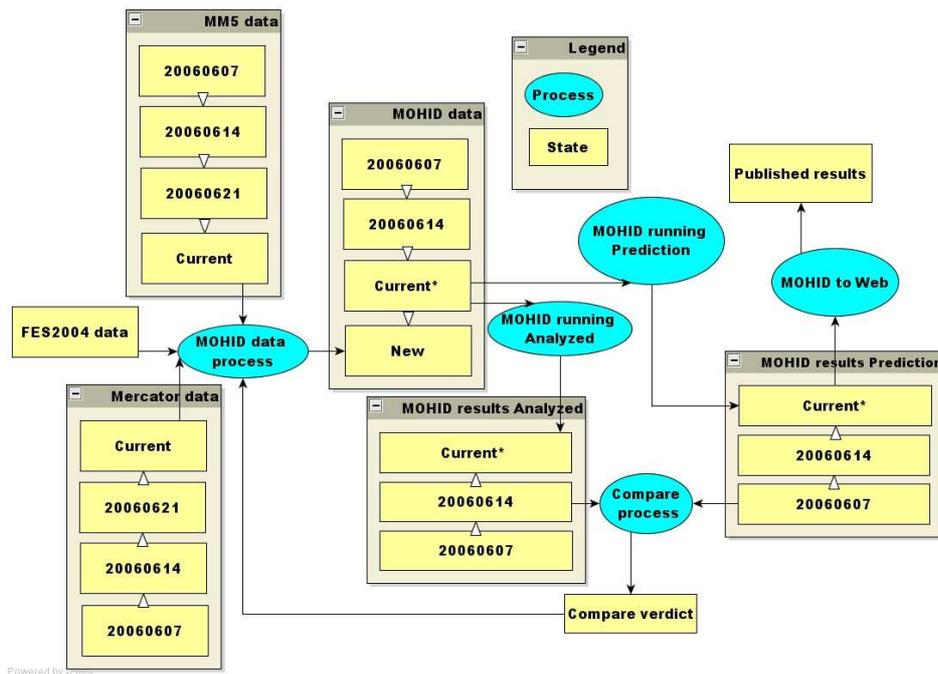
Systeme pré-opérationnel

Au cours de ce deuxième trimestre de travail nous avons tenu en compte la description faite du modèle pré-opérationnel dans le premier rapport [33]. Nous rappelons l'illustration schéma état-processus dans la figure 2.1. Toute une panoplie de petites modifications furent apportées lors de son application, même si le schéma original de la figure 2.1 reste inaltéré.

En gros, on peut aujourd'hui considérer que, exception faite pour le processus de comparaison et de validation, le plan pré-opérationnel est dans sa version *alpha*; c'est-à-dire qu'il semble fonctionnel mais qu'il a besoin d'être testé afin de juger son degré de robustesse.

De manière générale, l'automatisation des processus est programmée en langage script *perl* et *php*, la conversion des données est faite par du logiciel maison (*ConvertToHDF5* et *Convert2Netcdf*) et l'automatisation des processus est une combinaison de scripts propres au SO (*bash* ou *batch file*) avec des outils d'automatisation de tâches administratives (*crontab* ou *scheduler*). La communication et le transfert de fichiers à travers le réseau se fait par adresses *UNC*. Le service *Samba* sert à faciliter la reconnaissance entre unités au SO windows et au SO linux. Ceci résume la base technologique qui lie les divers états du schéma de la figure 2.1.

La mise en pratique de cette automatisation des processus est schématisée dans la figure 2.2 qui décrit la séquence synchrone des diverses procédures, ainsi que la ressource informatique attribuée. Deux grandes classes d'abordages sont possibles, a priori, pour traiter la séquence logique des opérations de A à Z : une séquence synchrone ou asynchrone des opérations. La première a besoin d'une horloge pour signaler le temps, et toutes les procédures feront appel à l'horloge pour savoir quand est-ce qu'elles devront se déclencher. La seconde a besoin d'un service qui supervise et ordonne correctement



Powered by Kumu

FIG. 2.1 – Schéma par états et par processus de l'information requise pour un système d'océanographie côtière opérationnel. Les rectangles représentent les états et les ellipses, les processus. Les flèches noires représentent les flux d'information entre états et processus et entre processus et états. Les flèches peintes en blanc représentent la relation causale dans le sens chronologique entre les états du système.

l'exécution des procédures. Le deuxième abordage est préférable par rapport au premier parce qu'il renforcera la robustesse potentielle du système. Si par hasard, une procédure "arrivait en retard", les probabilités d'une erreur dans le système seraient très grandes dans une séquence synchrone. Le retardement d'une procédure pourrait se devoir à cause de plusieurs facteurs, nommément :

- le temps de transfert de fichiers entre ordinateurs à travers le réseau intranet et internet est très variable,
- le temps d'exécution des programmes est très variable d'un ordinateur à l'autre, ou sur un même ordinateur, s'il se sert de la mémoire réelle ou virtuelle,

Ceci oblige à estimer des durées plus grandes qui envisagent les scénarios les "plus lents" et donc le système final est sous-optimisé par rapport à un système qui se serve d'une séquence asynchrone.

Néanmoins, malgré les inconvénients de la séquence synchrone, ce fut l'abordage choisi par sa commodité et sa facilité de mise en application (il est plus facile de configurer *crontab* et *scheduler* que de programmer un service résident multi-plateformes). Quand même, un effort a été fait pour que la séquence des procédures soit suffisamment flexible afin qu'une séquence asynchrone puisse facilement être mise en place, a posteriori.

Il se trouve que les procédures schématisées dans la figure 2.2 traitent essentiellement du transfert et de la transformation de fichiers : transfert de fichiers d'un ordinateur vers un autre (à travers *ftp*, *http*, *opendap*, *unc*, *samba* ...) et transformations de fichiers vers d'autres fichiers (conversion de format hdf5 vers netcdf, netcdf vers hdf5, entrées et sorties de données d'un modèle, etc...). Du fait qu'il est possible de décrire toute la séquence des procédures de la figure 2.2 avec des transferts et des transformations de fichiers. Dans la figure 2.3 est illustré une séquence d'un transfert puis d'une transformation d'un état (i.e. d'un fichier). Cette séquence serait le chaînon atomique d'une suite de transferts et transformations d'états (i.e. fichiers). Ainsi la séquence de transferts et transformations associés à la figure 2.1 pourrait être partiellement décrite par la figure 2.4. La séquence intégrale des transferts et transformations de fichiers nécessaires pour tourner notre système pré-opérationnel est séparée en trois morceaux :

1. Le pré-traitement des données de Mercator (fig.2.5),
2. le pré-traitement des données de MM5 (fig.2.6),
3. le post-traitement des résultats de Mohid et leur publication (fig.2.7).

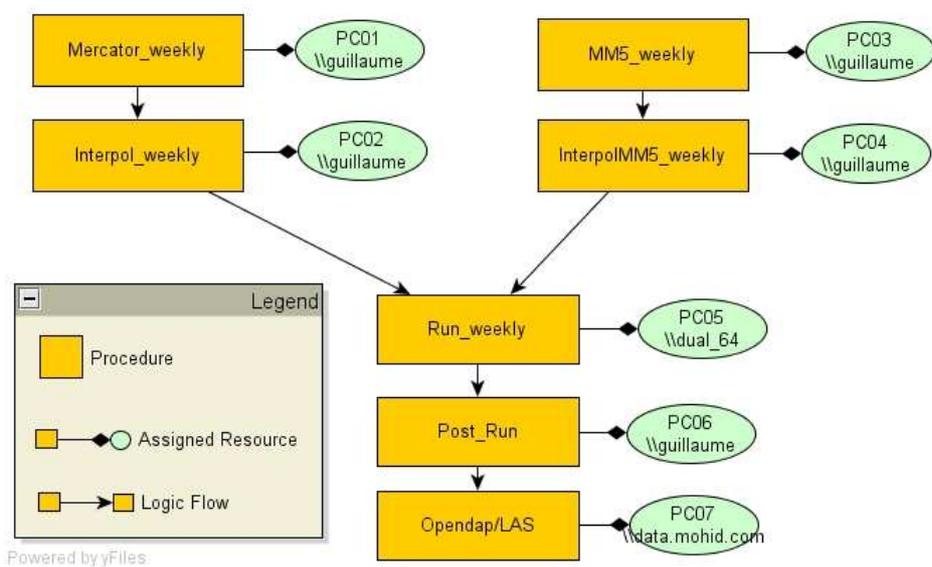


FIG. 2.2 – Diagramme de la séquence des procédures avec leurs ressources informatiques associées.

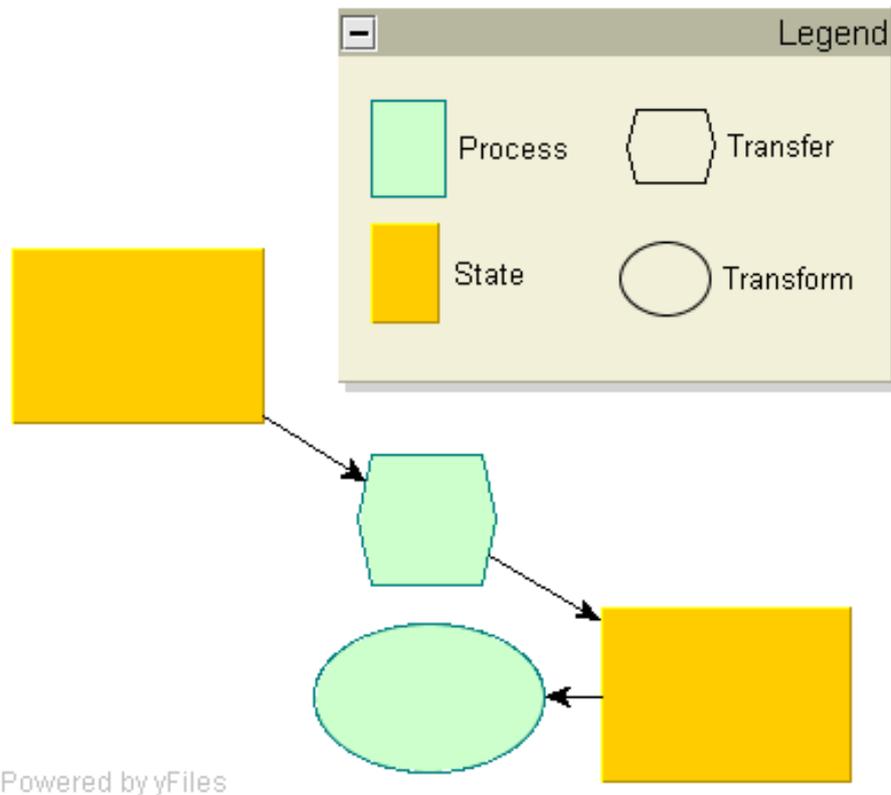
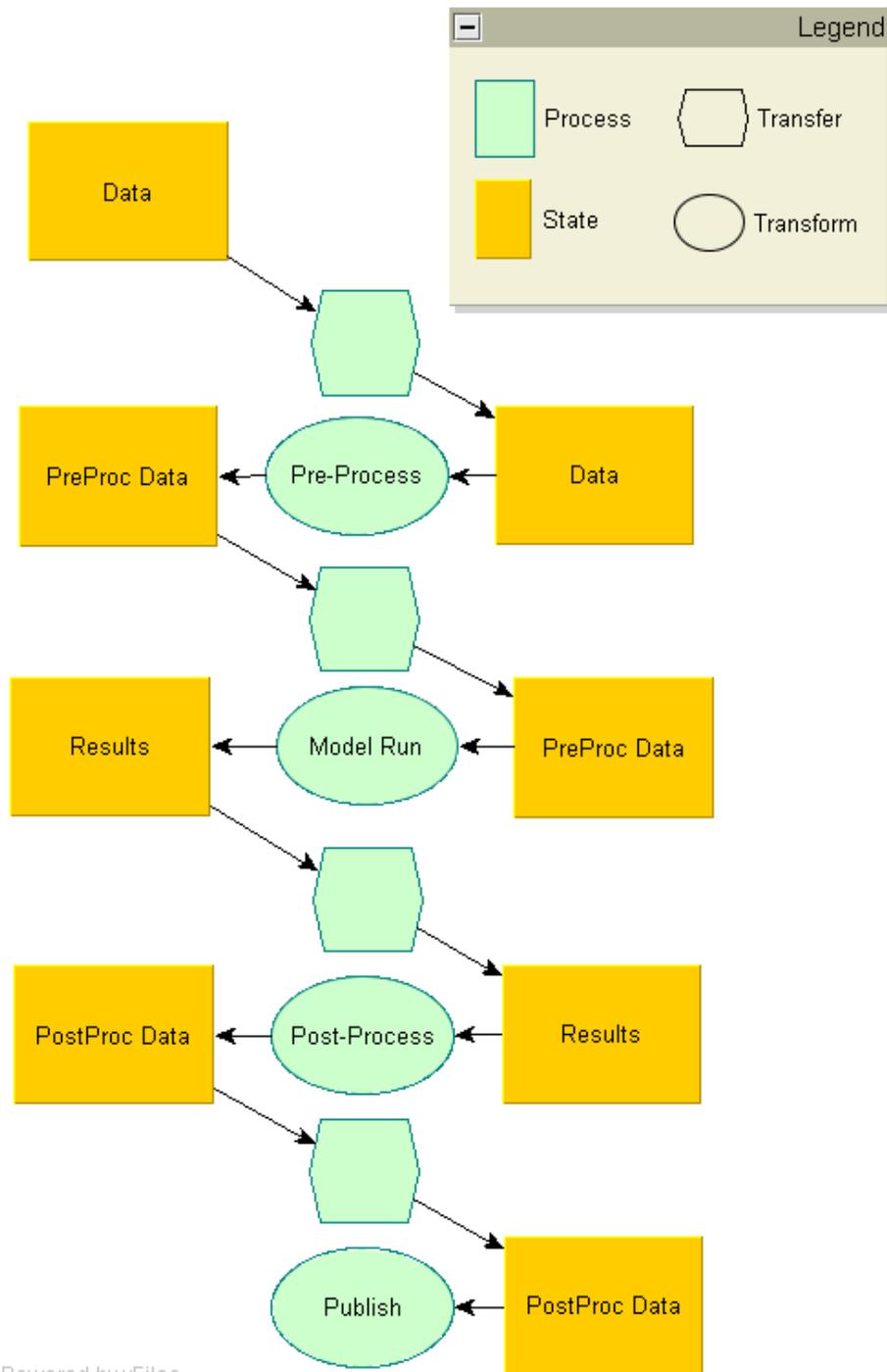


FIG. 2.3 – Chaînon élémentaire qui représente le transfert d'un état suivi de sa transformation vers un autre état. Le rectangle orange représente l'état ou l'objet ; l'hexagone vert représente le transfert de l'objet vers un autre locus et l'ellipse verte représente la transformation de l'objet vers un autre objet ou état. Par exemple, ça pourrait représenter le transfert d'un fichier *xml* entre ordinateurs puis sa transformation par une stylesheet *xsl* vers un fichier *xhtml*.



Powered by yFiles

FIG. 2.4 – Chaîne de transferts et transformations entre les principaux états d'un système opérationnel. Le chaînon élémentaire est décrit dans la figure 2.3. Les données de base (*Data*) sont transférées et transformées en données pré-processées ; puis ces dernières sont transférées vers le modèle en tant que données d'entrée, qui rend les données de sorties (les résultats). Ces derniers sont transférés puis transformés en données post-processées, qui à leur tour seront transférées puis publiées.

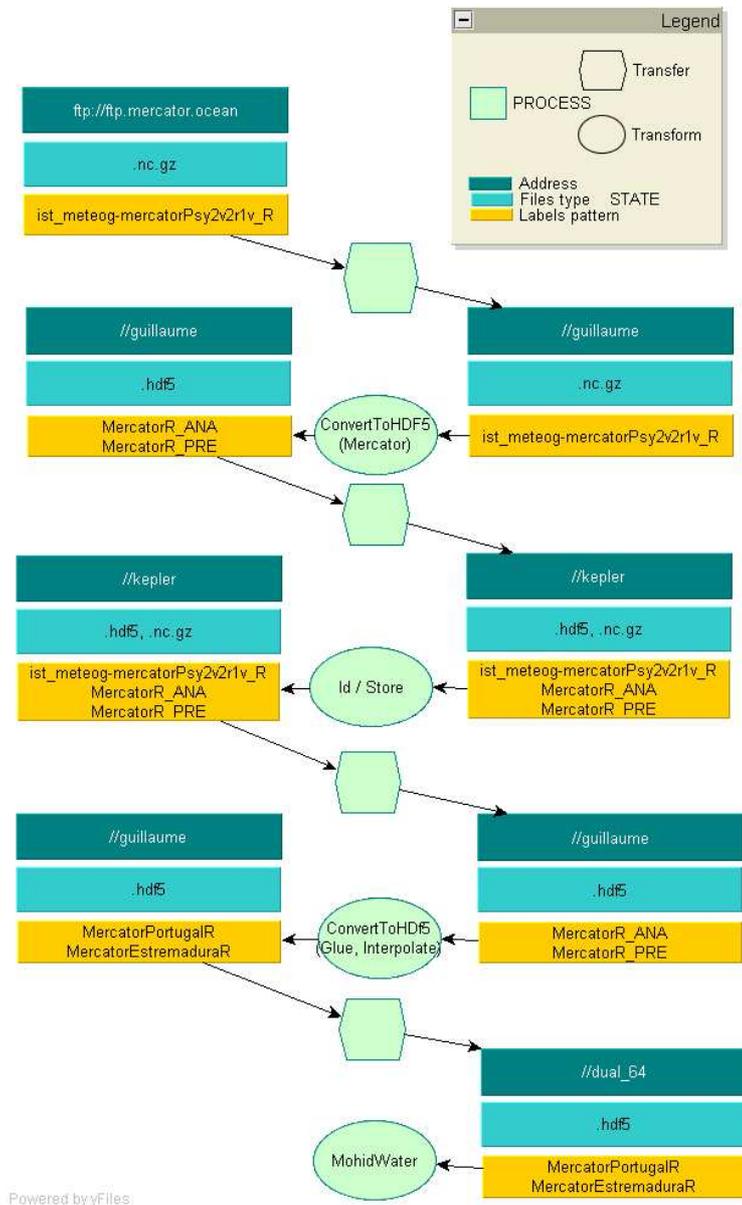


FIG. 2.5 – Chaîne des transferts et transformations opérées sur les fichiers de la solution de Mercator. Le chaînon de base est décrit dans la figure 2.3. Chaque état est sous-divisé en locus (ou adresse physique), extensions du type de fichier (ex : hdf5, nc, etc...) et modèle de la nomenclature des fichiers (ex : tous les fichiers netcdf de mercator ont un nom du genre ist_meteog-mercatorPsy2v2r1).

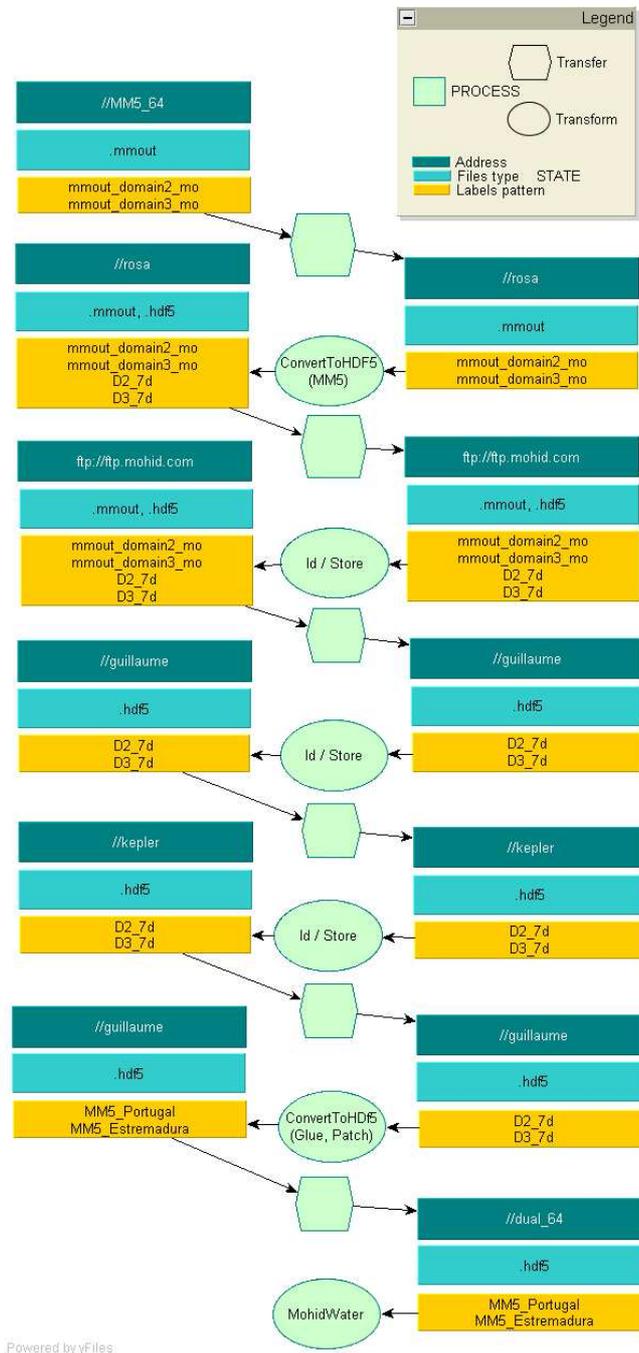


FIG. 2.6 – Chaîne des transferts et transformations opérées sur les fichiers de la solution atmosphérique MM5. Le chaînon de base est décrit dans la figure 2.3. Chaque état est sous-divisé en locus (ou adresse physique), extensions du type de fichier (ex : hdf5, nc, etc...) et modèle de la nomenclature des fichiers (ex : tous les fichiers netcdf de mercator ont un nom du genre ist_meteog-mercatorPsy2v2r1).

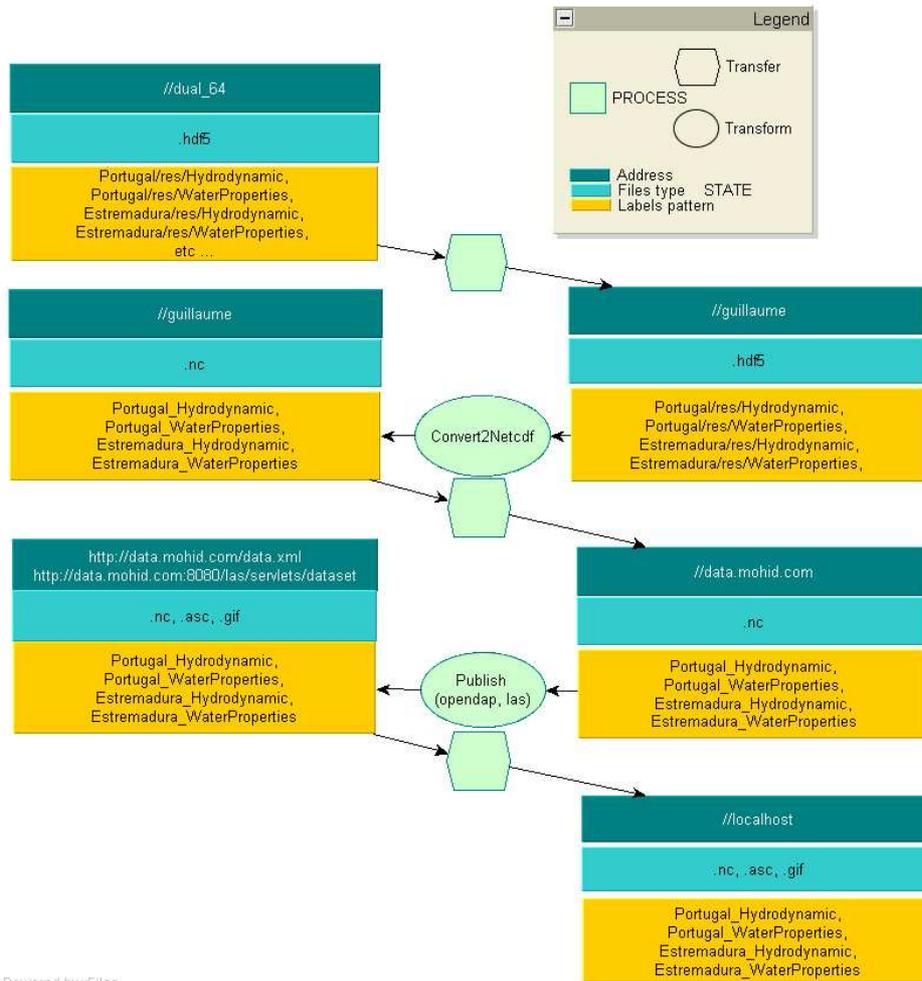


FIG. 2.7 – Chaîne des transferts et transformations opérées sur les fichiers des résultats de Mohid. Le chaînon de base est décrit dans la figure 2.3. Chaque état est sous-divisé en locus (ou adresse physique), extensions du type de fichier (ex : hdf5, nc, etc...) et modèle de la nomenclature des fichiers (ex : tous les fichiers netcdf de mercator ont un nom du genre ist_meteog-mercatorPsy2v2r1).

2.1 Traitement des données d'entrée

Le processus du traitement des données est illustré dans la figure 2.1 au niveau du *data process*. Il correspond aux divers traitements qui sont appliqués aux données des modèles externes (forçage océanique de large échelle, forçage atmosphérique en surface et forçage de marée). Ces traitements se séparent en plusieurs groupes :

- Acquisition automatisée des données des modèles externes,
- conversion automatisée des données des modèles externes en données traitables par MOHID,
- autres traitements.

Les procédures de la séquence synchrone qui composent le processus du traitement des données sont les procédures *Mercator_weekly*, *Interpol_weekly*, *MM5_weekly* et *InterpolMM5_weekly*, comme illustrées dans le schéma de la figure 2.2.

La procédure *Mercator_weekly* se charge d'obtenir par ftp la solution hebdomadaire PSY2v2r1, puis de la convertir au format HDF5 en deux fichiers uniques. L'un pour le mode analyse et l'autre pour le mode prévision. Enfin, le transfert des fichiers netcdf et hdf5 dans le serveur local de données est effectué. Le diagramme du flux de l'information est illustré dans la figure 2.8.

La procédure *Interpol_weekly* interpole les données des mailles de *M-O* vers les mailles *WI*, *P* et *C*, via l'outil maison *ConvertToHDF5*, puis transfère les fichiers vers l'ordinateur du réseau qui se chargera de tourner les modèles. Le diagramme du flux de l'information est illustré dans la figure 2.9.

La procédure *MM5_weekly* se charge d'extraire et de convertir les fichiers du modèle atmosphérique MM5 en HDF5 via le logiciel maison *ConvertToHDF5*, puis de les stocker dans l'ordinateur du réseau réservé à cet effet. Le diagramme du flux de l'information est illustré dans la figure 2.10.

La procédure *InterpolMM5_weekly* permet d'interpoler les données de MM5 vers les mailles *WI*, *P* et *C*, via le logiciel maison *ConvertToHDF5*, puis de transférer les fichiers vers la machine du réseau destinée à tourner les modèles. Le diagramme du flux de l'information est illustré dans la figure 2.11.

2.2 Mise en route du modèle

La procédure *Run_weekly* se charge de configurer correctement et de tourner le modèle Mohid, de sorte qu'il tienne en compte les données d'entrée

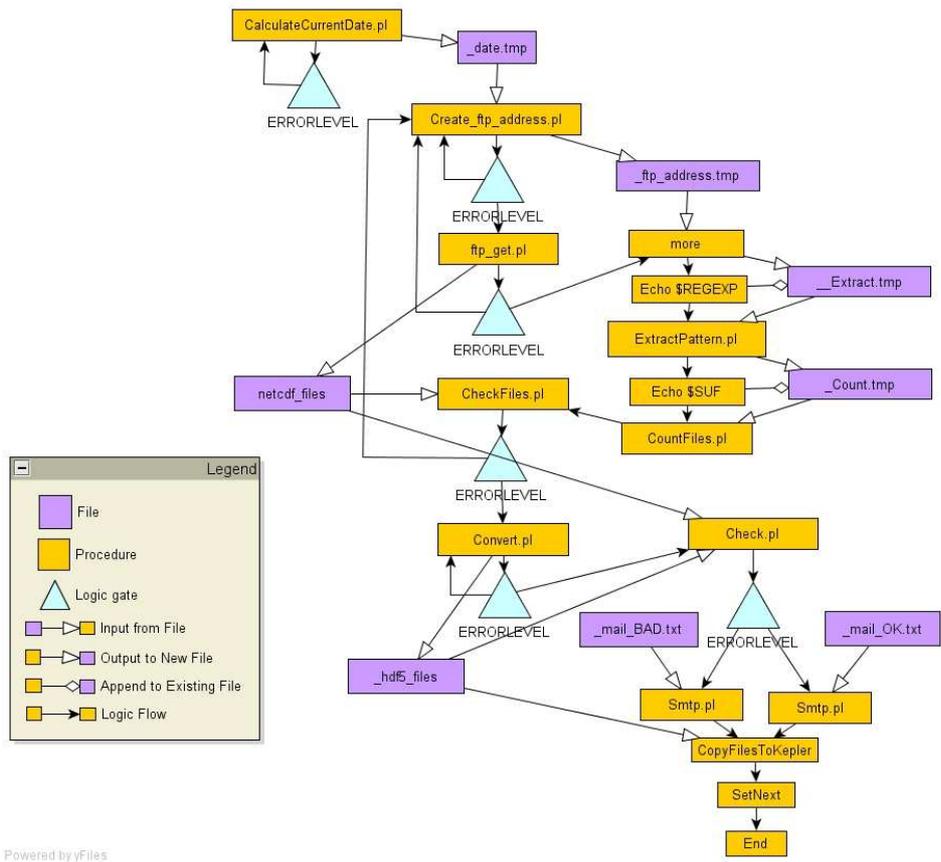


FIG. 2.8 – Diagramme de flux logique de l'information de la procédure *Mer-cator_weekly*.

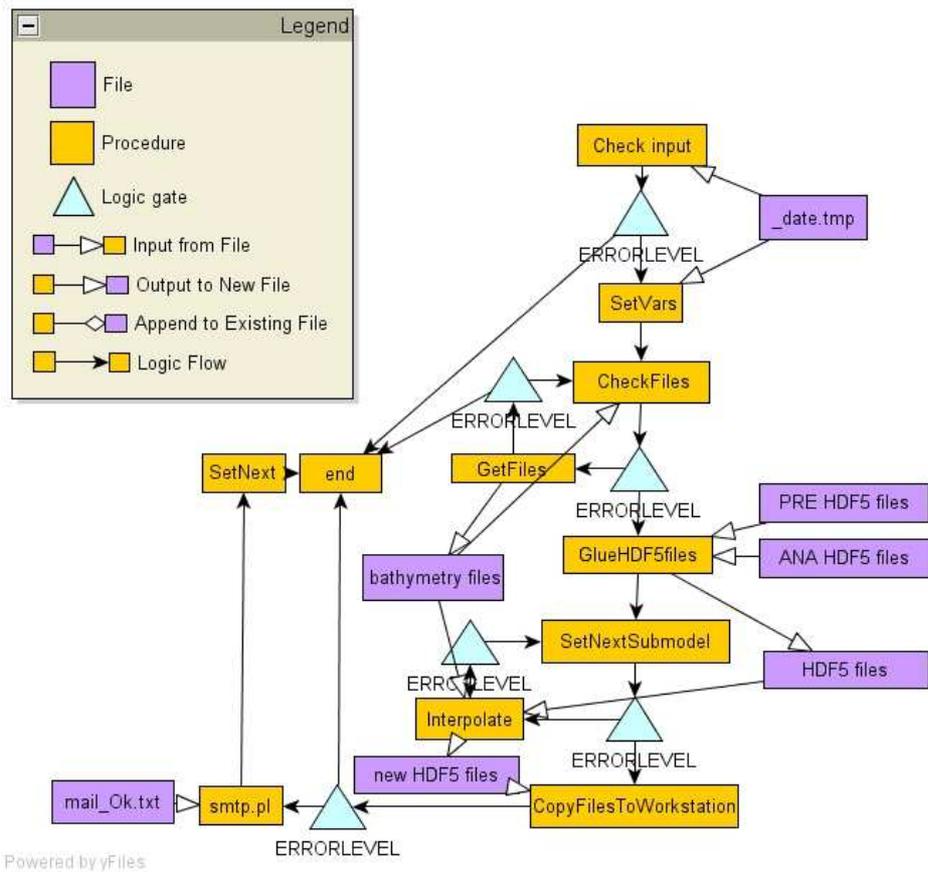


FIG. 2.9 – Diagramme de flux logique de l'information de la procédure *Interpol_weekly*.

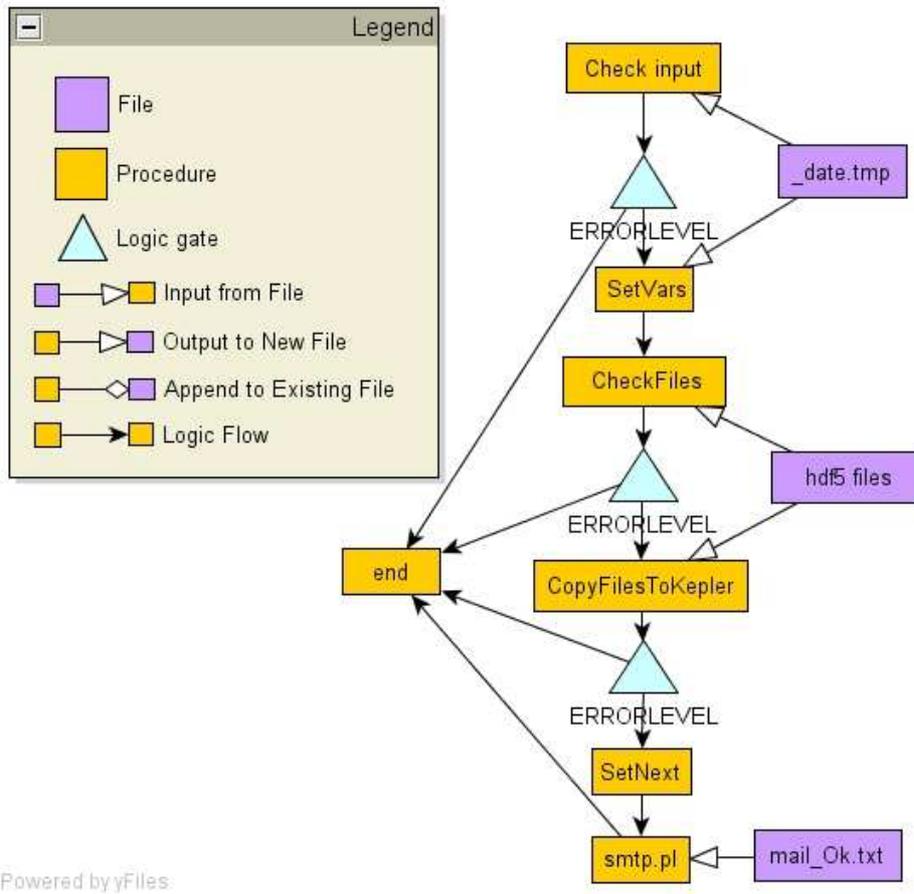


FIG. 2.10 – Diagramme de flux logique de l'information de la procédure *MM5_weekly*.

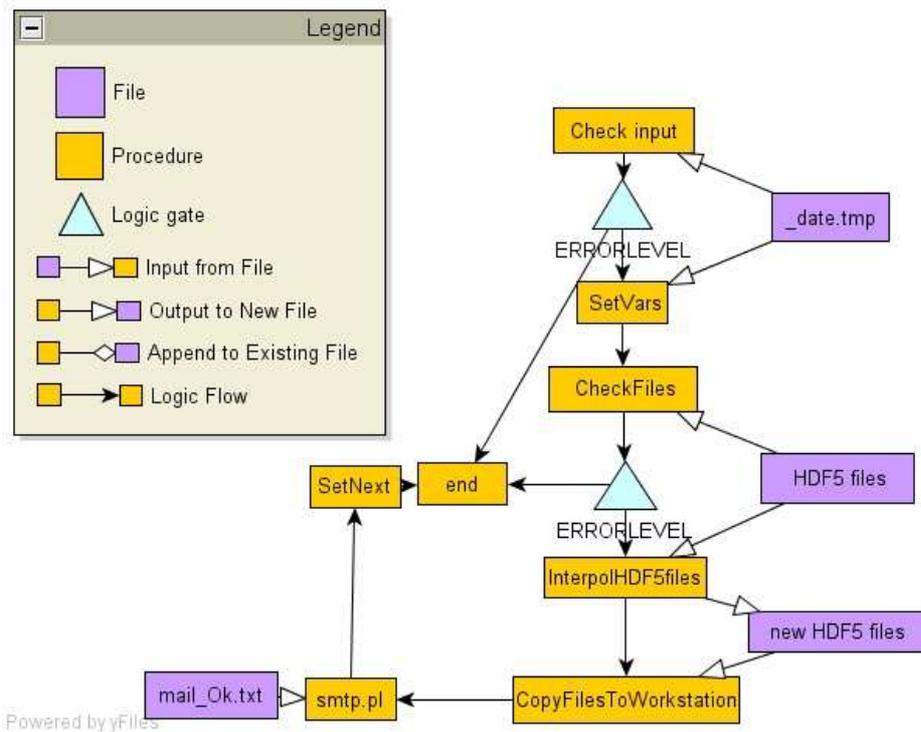


FIG. 2.11 – Diagramme de flux logique de l'information de la procédure *InterpolMM5_weekly*.

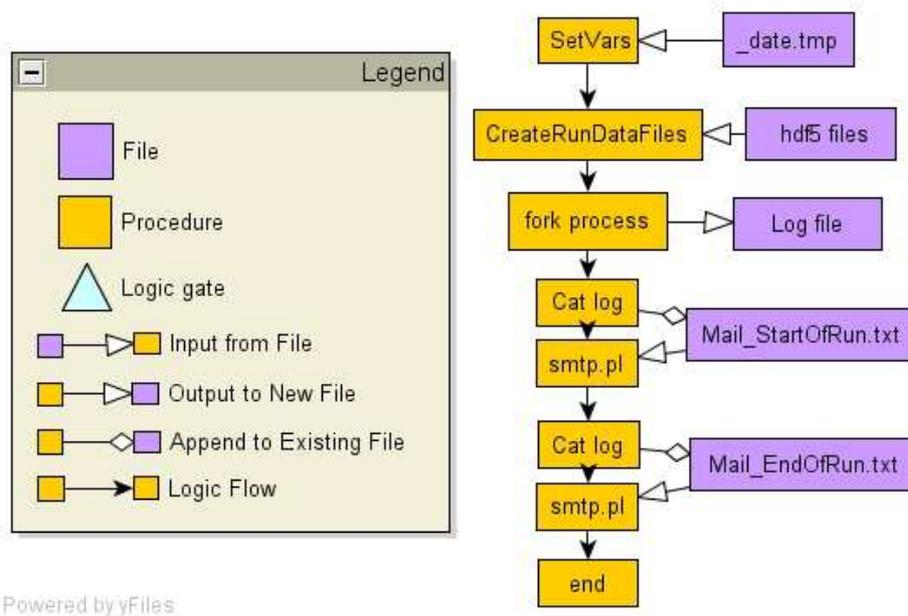


FIG. 2.12 – Diagramme de flux logique de l’information de la procédure *Run_weekly*.

de la semaine courante. Le diagramme du flux de l’information est illustré dans la figure 2.12.

2.3 Traitement des données de sortie

Le traitement des données de sortie se résume à transférer les fichiers binaires en *hdf5* puis à les transformer au format *netcdf*, tout en essayant de respecter au maximum la convention *CF*, grâce à l’outil maison *Convert2Netcdf*.

2.4 Publication des résultats

Le processus de publication des résultats illustré dans la figure 2.1 est géré avec plusieurs outils :

- Un server *OpenDAP* [13] ancré sur *Apache* de données en *netcdf*, qui servira les données sur *http*, et qui permet d’extraire de façon efficace

un sous-ensemble quelconque des résultats grâce à son système de *querying*.

- Un server *LAS* ancré sur *Tomcat*, qui permet le *browsing* des données et leur visualisation graphique avec la qualité du logiciel *Ferret* monté sur un site web¹.
- Une page internet centrale qui encadre les précédents services (centrée sur la technologie *xml* et *xslt*)². Attention de noter que le webbrowser *Opera* n'est pas encore doué des capacités de processement de pages en *xml+xsl* ou bien c'est qu'il est trop strict vis-à-vis de la syntaxe *xsl*.

L'installation de *Opendap* [16] se fait sans problèmes. Par contre l'installation et la configuration du *LAS* est nettement plus ardue. En particulier, si le webbrowser n'est pas doué des options *javascript* et *java* activées, le server *tomcat* du *LAS* peut tomber ! Ceci est un problème de mauvaise configuration du *LAS* encore non-résolu. Cela dit, pourvu que l'utilisateur soit assez familiarisé avec le *LAS*, il devrait s'y retrouver aisément.

Le schéma de publication des résultats, illustré dans la figure 2.12, passe par la conversion des résultats du MOHID au format *HDF5*, en résultats au format *netcdf*, en essayant de suivre au mieux la convention *CF*³. Puis, toute une série de scripts en *perl*, *bash* et *php*, assurent la régénération automatique de l'interface du *LAS* (voir figure 2.13) ainsi comme celle de la page internet.

La page internet est très expérimentale (voir figure 2.14), bien que suffisamment fonctionnelle pour marcher avec *OpenDAP* et *NcBrowse*. Elle innove par sa technologie qui emploie le *xml*, le *xsl* et le *css*, ainsi que la capacité des web-browsers modernes de générer le *xhtml* correspondant.

Il ne sera jamais assez dit que l'interface internet avec l'utilisateur est encore très expérimentale. C'est un des aspects à améliorer dans le futur.

2.5 Validation des résultats

Ce processus, illustré dans la figure 2.1, reste le moins réfléchi du paquet à ce moment mais il est le plus critique pour valider la qualité des résultats. La comparaison automatisée avec des photographies de satellites des champs de température en surface, ainsi que des données de terrain, est envisagée. Comparer les résultats avec la solution de Mercator-Océan est bien sûr souhaitable. S'inspirer de l'expérience acquise lors des travaux

¹<http://data.mohid.com:8080/las/servlets/dataset>

²<http://data.mohid.com/index.xml>

³<http://www.cgd.ucar.edu/cms/eaton/cf-metadata>

MOHID
Water Modelling System

OP&NDAP (FDS) | THREDDS | Index | Search:

single data set | **compare two**

Datasets
Variables
Constraints
Previous Output
Define variable
About
LAS UI Version 6.5.2.1

Datasets
Welcome to LAS.
This session will expire after 180 minutes of inactivity.

Click on a dataset to continue or an **i** for information about a dataset. [Help](#)

Select dataset:

- [i COADS climatology](#)
- [i Hydrodynamic Mercator-JST 20060609](#)
- [i HydrodynamicMercator-JST 20060609](#)
- [i Levitus Climatology](#)
- [i Mercator-JST 20060609 Portugal Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20060609 Portugal WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061122 Portugal Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061122 Portugal WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061129 Estremadura Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061129 Estremadura WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061129 Portugal Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061129 Portugal WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061206 Estremadura Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061206 Estremadura WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061206 Portugal Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061206 Portugal WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061213 Estremadura Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061213 Estremadura WaterProperties](#)
- [i Mercator-JST 20061213 Portugal Hydrodynamic](#)
- [i Mercator-JST 20061213 Portugal WaterProperties](#)

FIG. 2.13 – Page d’entrée du LAS de Mohid.



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Home
LAS >>
Data >>
Search
Contacts

MOHID Data Repository

Data repository

Click on a dataset to browse its content and extract data. To graphically inspect dataset use NcBrowse, a java client. Download it here. To open a dataset in NcBrowse simply click copy/paste its data-url in the OpenDAP menu in NcBrowse.

Project	File	Attributes
Estremadura	20060609_Estremadura_Hydrodynamic.nc	info.dds.das
Estremadura	20060609_Estremadura_WaterProperties.nc	info.dds.das
Portugal	20060609_Portugal_Hydrodynamic.nc	info.dds.das
Portugal	20060609_Portugal_WaterProperties.nc	info.dds.das
Portugal	20061122_Portugal_Hydrodynamic.nc	info.dds.das
Portugal	20061122_Portugal_WaterProperties.nc	info.dds.das
Estremadura	20061129_Estremadura_Hydrodynamic.nc	info.dds.das
Estremadura	20061129_Estremadura_WaterProperties.nc	info.dds.das
Portugal	20061129_Portugal_Hydrodynamic.nc	info.dds.das

FIG. 2.14 – Page d’entrée qui donne accès aux résultats du modèle via netcdf.

de Mercator-Océan et d'autres groupes de modélisation opérationnelle est, évidemment, fondamental.

Chapitre 3

Modélisation de l'hydrodynamique de la côte Portugaise

MOHID est un modèle hydrodynamique qui suit une discrétisation selon la méthode des volumes finis [25] des équations de Navier-Stokes d'un fluide en rotation selon l'approximation du plan β , l'approximation hydrostatique et l'approximation de Boussinesq, qui découlent de l'analyse dimensionnelle d'un fluide géophysique [8]. MOHID résout aussi une équation d'état non-linéaire de la densité de l'eau en fonction de la pression, de la température potentielle et de la salinité [28]. Enfin, pour calculer les coefficients de mélange vertical turbulents, MOHID a intégré GOTM [9] qui résout un modèle $k - \epsilon$. En l'occurrence le paramétrage proposé par Canuto [10] est employé ainsi que celui défini par Craig [14] concernant le mélange vertical induit par l'action du vent. Les mailles de MOHID sont de type C [3] selon l'horizontale, et peuvent avoir une discretization verticale générique hybride entre les types z , sigma [23] ou lagrangiens [25]. En l'occurrence, les modèles bidimensionnels sont sigma et les modèles tridimensionnels ont une coordonnée verticale lagrangienne avec *partial-step* [1] pour les cellules du fond. Le schéma numérique temporel est un schéma à directions alternées semi-implicite [25]. Le schéma numérique de la discrétization spatiale est un schéma de type TVD [19].

Une description de chacun des modèles se suit. Les tables 3.1 et 3.2 synthétisent les conditions aux limites, l'initialisation et l'assimilation.

Conditions aux limites	
Surface	modèles
Forçage des vents MM5	
sur maille interpolée de l'équation 3.1.	P, C
Flux de chaleurs interpolés	
des données de MM5.	P et C
Conditions de frontière ouverte	modèles
<i>FRS</i> [26] de <i>M-O</i> pour U, V, T, S.	P et C
Interpolation de η , U, V, T et S.	P et C
Radiation de <i>Blumberg</i> [6] du mode barotrope.	WI
Radiation de <i>Flather</i> [18] du mode barotrope.	P et C
<i>Sponge layer</i> .	P et C
Frontières terrestres	modèles
Décharges d'eau fraîche.	P et C
Flux nuls de (U,V).	WI, P et C
Frontières au fond	modèles
Forçage du fond selon l'équation 3.3.	WI, P et C

TAB. 3.1 – Conditions aux limites des modèles niddés. Les sigles mentionnées signifient : Composantes zonales et méridionales de la vitesse (U , V), Température (T) et Salinité (S), niveau de la mer par rapport à une surface au repos (η), *Flow Relaxation Scheme* (*FRS*), modèles de Mercator-Océan (*M-O*), de la côte Ibérique Ouest bidimensionnel (*WI*), de la côte du Portugal (*P*), du banc de l'Estrémadure (*C*).

Initialisation	
U, V, S et T sont interpolés à partir du modèle <i>M-O</i> .	<i>P</i> et <i>C</i>
η est initialisé à un niveau de référence.	<i>WI, P</i> et <i>C</i>
Assimilation	
<i>FRS</i> de U, V, T et S selon l'équation 3.6.	<i>P</i> et <i>C</i>
Démarrage	
Ignition de la force baroclinique et du forçage du vent sur 10 périodes inertiales.	<i>P</i>
Ignition du <i>FRS</i> et de la radiation de <i>Flather</i> sur 10 périodes inertiales.	<i>P</i>

TAB. 3.2 – Condition d'initialisations, d'assimilations et de démarrage des modèles niddés. Les sigles mentionnées signifient : Composantes zonales et méridionales de la vitesse (U, V), Température (T) et Salinité (S), niveau de la mer par rapport à une surface au repos (η), *Flow Relaxation Scheme* (*FRS*), modèles de Mercator-Océan (*M-O*), de la côte Ibérique Ouest bidimensionnel (*WI*), de la côte du Portugal (*P*), de la côte centre du Portugal (banc de l'Estrémadure) (*C*).

3.1 Forçage atmosphérique

Le forçage du vent sera calculé selon [31]

$$\tau_w^u = \rho_a C_a u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (3.1)$$

où τ_w^u est la tension de friction par action du vent, $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'air, C_a est un coefficient de friction dont ses valeurs sont décrites dans Leitao2003[29], enfin u_{10} et v_{10} sont les composantes horizontales de la vitesse de l'air à 10 m de haut de la surface de la mer.

Les flux atmosphériques de chaleur sensible, chaleur latente, radiation solaire, température à la surface, précipitation et évaporation sont aussi calculés. Le modèle sera ainsi couplé, en mode *offline*, aux résultats du modèle MM5 [20] du groupe du professeur J. J. Delgado Domingos de l'IST, forcé par les prévisions sur 7 jours du Global Forecasting Model (GFS). Le modèle atmosphérique simule trois mailles niddées englobant la région $20^\circ O, 28^\circ N$ à $5^\circ O, 50^\circ N$ dont le relief est illustré dans la figure 3.1, de résolutions de 81, 27 et 9 km ; et est doué de 25 couches pour la résolution verticale. Il simule les vents, la chaleur sensible, la chaleur latente, la radiation solaire, la précipitation, l'évaporation, l'humidité spécifique, relative, et la couverture

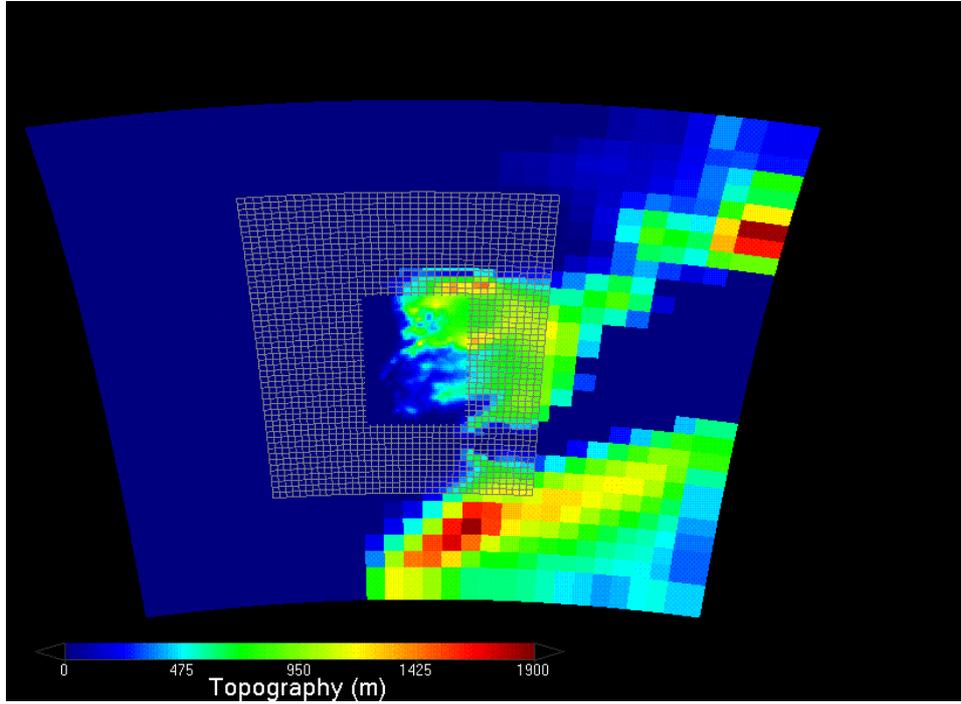


FIG. 3.1 – Bathymétries niddées de la solution MM5 du groupe du professeur J. J. Delgado Domingos, dénommée *MM5-IST*.

par les nuages.

3.2 Forçage océanique

3.2.1 Au fond

Pour le forçage du fond on emploiera [31]

$$\tau_b^u = \rho_0 C_D u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (3.2)$$

où τ_b^u est la tension de friction du fond, u_b et v_b sont les composantes horizontales de la vitesse proche du fond, avec ρ_0 comme étant la densité de référence, avec, pour coefficient de friction [29],

$$C_D = k / \ln \left(\frac{z_D + z_0}{z_0} \right)^2 \quad (3.3)$$

où z_D est la distance au fond, z_0 est la taille de la rugosité (*roughness length*). La constante de Von Karman vaudra [29] $k = 0.4$. La rugosité au fond est stipulée à $z_0 = 0.0025 \text{ m}$ pour tout les modèles.

3.2.2 Aux frontières latérales terrestres

Au frontières latérales terrestres est employée une condition de flux de masse et de quantité de mouvement nul

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$$

où \vec{v} est le vecteur vitesse et \vec{n} est le vecteur normal à l'interface latérale terre-mer.

Une décharge d'eau fraîche continue, en provenance du Tage, est simulée à partir de données en provenance de l'*INAG (Instituto da Água)*.

3.2.3 Aux frontières ouvertes

Pour avoir des conditions de frontière ouverte cohérentes, il est nécessaire une bonne solution de référence [5]. La solution de l'Atlantique nord et du bassin méditerranéen de haute résolution fournie par Mercator est probablement une des solutions les plus fiables [17],[4] pour fournir une circulation réaliste au large de la péninsule Ibérique et dans le golfe de *Cádiz*. En effet, tout en assimilant des données *in-situ*, de *SLA* et de prévisions atmosphériques de l'*ECMWF*, la solution Mercator permet de reproduire les caractéristiques fondamentales de la circulation au large de la péninsule Ibérique, notamment le *Mediterranean Outflow (MO)*, les branches qui en découlent [2],[7],[21] ainsi que la formation de meddies proche du Cap de Saint-Vincent et sur le banc de l'Estrémadure [30],[7]. Toutefois la génération de meddies dans le modèle au cap de Saint-Vincent est inférieure aux observations. Ceci est possiblement dû à la coordonnée verticale z employée qui nuit, selon Drillet [17] à l'affaissement du *MO* à la sortie du détroit de Gibraltar, dans le golfe de *Cádiz*. Pour pallier cet insuffisance du modèle, Drillet [17] employa une relaxation vers la climatologie de Reynaud [32], ce qui améliora la simulation de l'affaissement. Néanmoins, ceci introduit un biais vers une salinité et une température inférieure par rapport aux observations [17] d'environ 0.15 psu et 0.75°C respectivement. Enfin, il convient de faire remarquer que, dans la généralité des cas, les meddies formés dans le modèle ont un rayon comparable ou supérieur ($> 75 \text{ km}$) aux plus grands

meddies observés [17], ce qui peut être une conséquence d’une résolution verticale insuffisante. En outre, le rayon de courbature de la trajectoire des meddies est plus grand que celui des observations [17]. Cela dit, la solution Mercator est une bonne solution de référence, vraisemblablement la meilleure, capable de forcer un modèle de façon opérationnelle. La figure 3.2 illustre la bathymétrie de l’extraction qui s’étend à peu près de $24.5^{\circ}O$, $28^{\circ}N$ jusqu’à $4^{\circ}O$, $51^{\circ}N$ qui est fournie à l’IST de façon hebdomadaire. La solution Mercator est interpolée sur les mailles du modèle MOHID en deux étapes :

1. Une triangulation bi-dimensionnelle horizontale de chaque couche vers la maille horizontale des modèles de MOHID.
2. Une interpolation linéaire pour chaque colonne verticale des 43 couches de Mercator vers les 42 couches de MOHID. La réduction des couches fut effectuée dans le but d’améliorer la performance du temps de simulation.

La solution de Mercator interpolée vers les mailles des modèles de Mohid est dénommée *M-O*.

3.3 Modèle barotropique

Étant donnée que le groupe a beaucoup d’expérience pour simuler correctement la marée avec le forçage du FES95 et FES2004 [24], et afin de ne pas perdre le travail acquis par le groupe à ce propos, l’idée de créer une solution de référence barotropique qui serait superposée avec la solution de Mercator (qui est *rigid-lid*) fut proposée. La figure 3.3 illustre la bathymétrie du modèle barotropique dénommé *WI*. Le domaine, ayant une résolution horizontale de 0.06° et temporelle de 180 s , est borné par l’ensemble $[-13.7^{\circ} - 5.3^{\circ}] W \times [33.5^{\circ}46.1^{\circ}] N$. La solution de référence du niveau de l’eau aux frontières ouvertes est reconstituée à partir des composantes harmoniques de la marée de la solution de FES2004. Puis une condition radiative du niveau proposée par *Blumberg* [6] du type

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{c} \cdot \vec{n} \nabla \eta = -\frac{\eta - \eta_{ref}}{T_{lag}} \quad (3.4)$$

est employée comme condition de frontière ouverte pour le niveau de l’eau. η est le niveau, η_{ref} est le niveau de référence, \vec{c} est la célérité de l’onde externe estimée à \sqrt{gH} , \vec{n} est le vecteur normal externe à la surface de la frontière ouverte, g est l’accélération de la gravité, H est la profondeur et T_{lag} est la constante de temps de la relaxation. La valeur de la constante

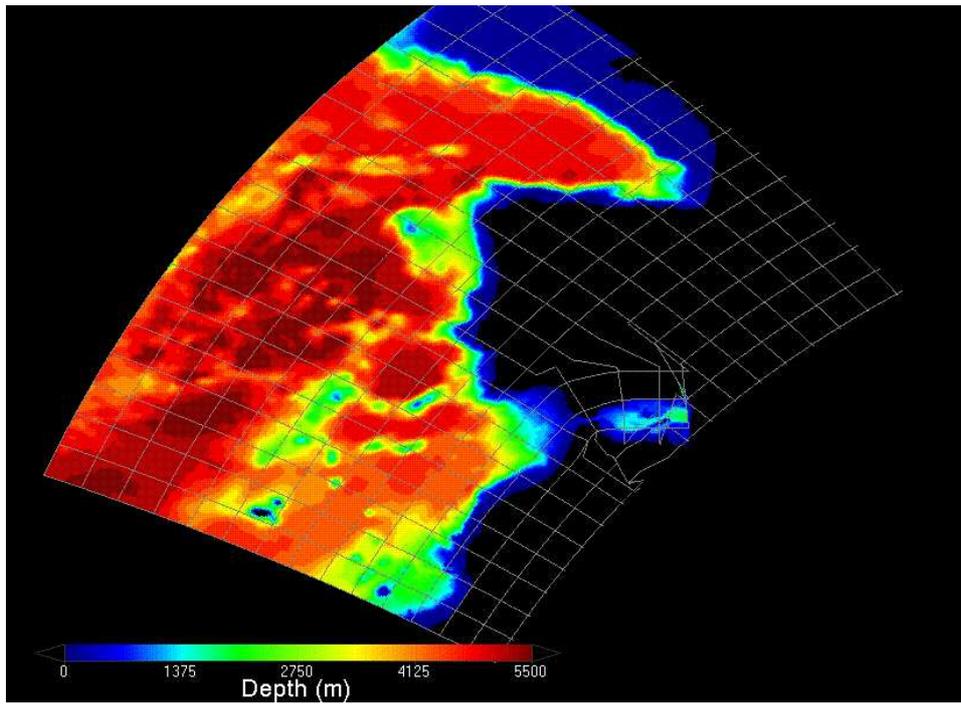


FIG. 3.2 – Bathymétrie de la solution PSY2v2r1 de Mercator-Océan, dénommée *M-O*.

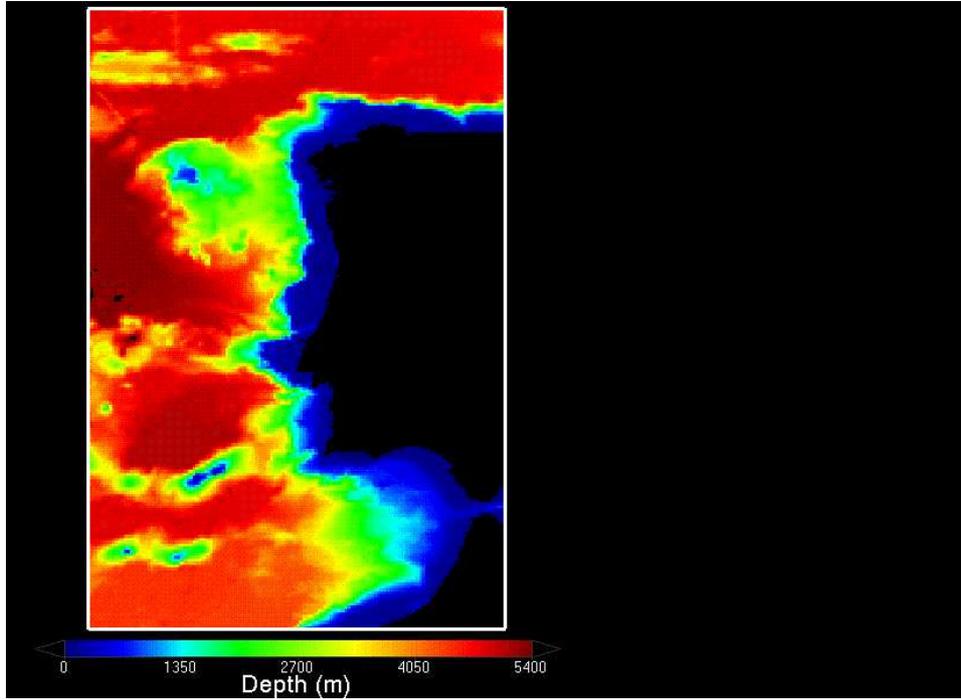


FIG. 3.3 – Bathymétrie du modèle barotrope de la côte ouest de la péninsule Ibérique, dénommée *WI*.

de relaxation utilisé est de 200 s en eaux profondes, et est graduellement augmentée jusqu'à 2000 s en eaux rases près de la côte. Un filtre biharmonique sert à filtrer le bruit de haute-fréquence. Il possède un coefficient de $10^9 \text{ m}^4/s$. La force barotrope dans le modèle est lentement activée sur 10 périodes inertiales à peu près. Ce modèle ne possède pas de forçage atmosphérique.

3.4 Modèle de la côte Portugaise

Le modèle de la côte portugaise est 3D baroclinique, et est composé de 42 couches verticales. Le domaine, ayant une résolution horizontale de 0.06° et temporelle de 180 s , est borné par l'ensemble $[-12.6^\circ - 5.5^\circ] W \times [45.0^\circ 34.4^\circ] N$. En plus du forçage du fond, il est forcé à la surface par les outputs du modèle MM5, et aux frontières ouvertes par le modèle *WI* et la solution *M-O*. Le forçage du vent est lentement activé sur 10 périodes

inertiales.

Le niveau est radié par une condition de *Flather* [18] ayant comme solution de référence la superposition linéaire des vitesses barotropiques et des niveaux de *WI* et de *M-O* :

$$(\vec{q} - \vec{q}_{ref}) \cdot \vec{n} = (\eta - \eta_{ref}) (\vec{c} \cdot \vec{n}). \quad (3.5)$$

\vec{q} et \vec{q}_{ref} sont le flux barotropique du modèle et le flux barotropique de la référence, \vec{n} est la normale externe à la surface aux frontières ouvertes, η et η_{ref} sont le niveau du modèle et le niveau de la référence. \vec{c} est la célérité des ondes de surface. Sa valeur est approchée par \sqrt{gH} . Le flux barotropique est l'intégration de la vitesse au long de la colonne d'eaux et les variables de la solution de référence sont la superposition linéaire des variables respectives de *M-O* et de *WI*. La condition de radiation de *Flather* est activée lentement sur 10 périodes inertiales.

Par ailleurs, un schéma de relaxation, décrit dans *Martinsen et Engedahl* [26], est appliqué à S , T , U et V , respectivement la salinité, la température, la vitesse zonale et la vitesse méridionale :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\Phi - \Phi_{ref}}{\tau}. \quad (3.6)$$

Φ est la variable relaxée, Φ_{ref} est la solution de référence et τ est la constante de temps de relaxation. La constante de relaxation varie depuis 3×10^4 s à la frontière jusqu'à 1×10^9 s à l'intérieur du domaine.

Le coefficient du filtre biharmonique est fixé à $1 \times 10^{10} m^4/s$.

La viscosité turbulente horizontale est estimée à $10 m^2/s$ dans l'intérieur du domaine, mais une barrière visqueuse, large de dix cellules (*sponge layer*), est appliquée aux frontières ouvertes. La barrière visqueuse évolue graduellement de l'intérieur jusqu'à la frontière où elle atteint la valeur de $1.8 \times 10^4 m^2/s$.

Le modèle est dénommé P et est illustré dans la figure 3.4.

3.5 Modèle de l'Estrémadure

Le modèle de la région du banc de l'Estrémadure ne varie du modèle P que par une résolution horizontale et temporelle différentes (0.02° et $90s$ respectivement). Mais il varie aussi dans la condition de radiation du niveau aux frontières ouvertes où il ne tient en compte, pour le niveau et pour la vitesse barotropique de référence, que ceux en provenance du modèle P . Ce modèle devrait être capable de faire évoluer des processus physiques de plus

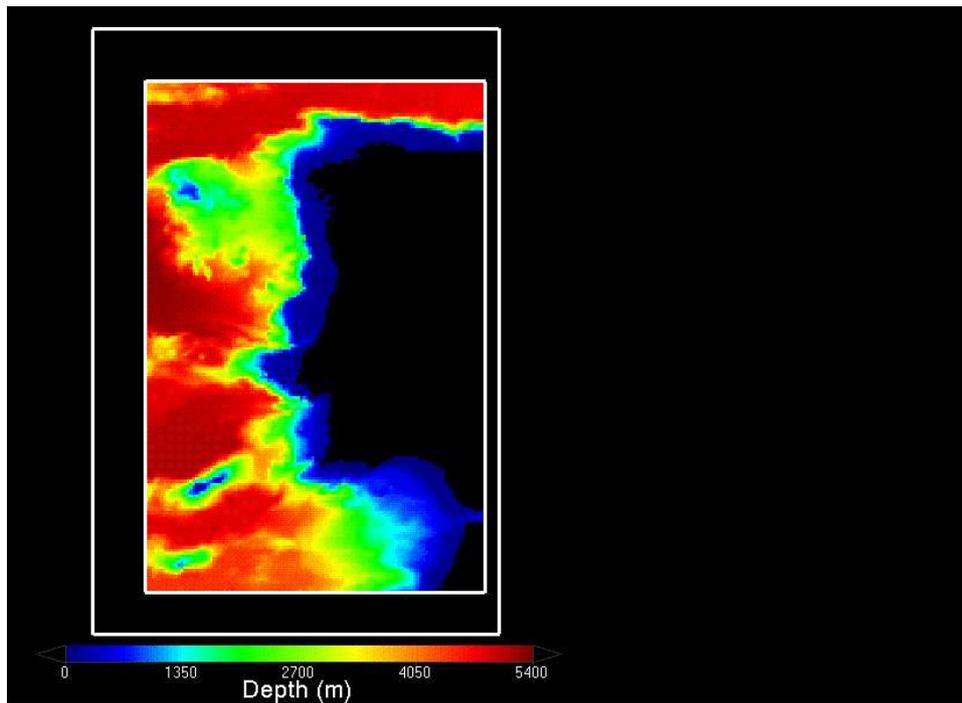


FIG. 3.4 – Bathymétrie du modèle baroclinique de la côte ouest de la péninsule Ibérique, dénommée *P*.

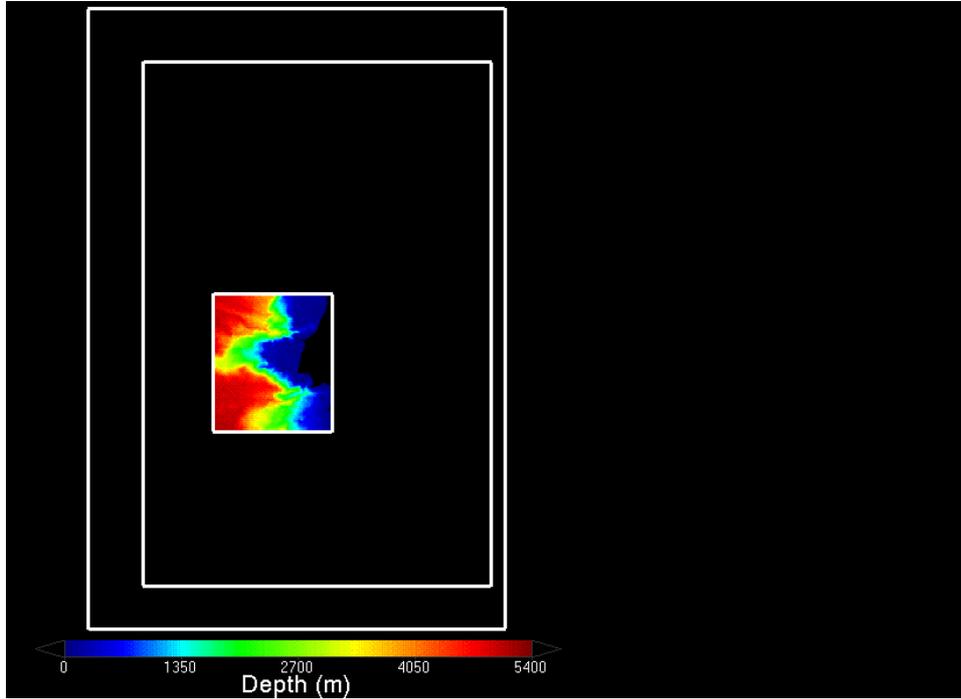


FIG. 3.5 – Bathymétrie du modèle régional de la zone centre du Portugal, dénommée *C*.

fine échelle. En particulier ceux qui découlent de l'échelle spatiale associée au premier rayon de déformation baroclinique de Rossby qui, au niveau de la côte du Portugal, devrait être environ de l'ordre de 25km [11]. Stevens [34] suggère qu'il faut une résolution 10 fois supérieure pour pouvoir espérer résoudre les processus les plus fins associés au rayon de déformation baroclinique de Rossby (2.5km en l'occurrence). 0.06° de résolution ne seraient pas assez, mais 0.02° le sont. On peut donc souhaiter voir apparaître une autre gamme de processus qui à l'échelle du domaine *P* ne pouvaient pas se manifester.

Ce modèle est dénommé *C* (comme "centre") et sa bathymétrie est illustrée dans la figure 3.5.

Chapitre 4

Résultats

Le modèle est programmé pour tourner toutes les semaines avec les derniers 7 jours d'analyse et les prochains 7 jours de prévision de la solution Mercator (*M-O*) et de la solution atmosphérique (*MM5-IST*). Pour l'instant nous n'avons pas fait de continuation de calcul et nous nous limitâmes à initialiser chaque semaine le modèle avec les champs d'analyse *S* et *T*, de la solution Mercator. Il suffit au modèle Mohid d'environ 1 semaine à 10 jours pour développer des courants consistants et comparables à ceux de la solution Mercator (fig.4.4 et fig.4.5). Toutefois, il est envisagé de faire de la continuation de calcul plutôt que de reinitialiser toutes les semaines. Le modèle aura tourné avec succès pendant les prévisions hebdomadaires datées du 9 Septembre 2006, du 22, 29 Novembre 2006, du 6, 13, 20 et 27 Décembre 2006. Le modèle aura eu des problèmes de stabilité pendant les prévisions commençant le 3 et le 10 Janvier 2007. Ces problèmes sont encore en train d'être résolus. Les résultats sont accessibles par *opendap* au format *netcdf* sur le site internet¹. Ils peuvent être inspectés, par exemple, avec l'application *ncbrowse*.

Nous avons essayé de comparer les résultats des solutions Mercator et Mohid. Des comparaisons entre les champs instantanés de température et de salinité à plusieurs profondeurs sont illustrés dans les figures 4.1 et 4.2 respectivement. Les champs du domaine de l'Estrémadure (*C*) sont superposés sur ceux du domaine du Portugal (*P*). On peut observer un gain général dans la variabilité spatiale des fronts qui se forment dans le domaine *C* dû à sa meilleure résolution, toutes profondeurs, toutes variables confondues. À la profondeur de la thermocline locale sur le banc de l'Estrémadure, à 250 mètres de profondeur, sont observées dans la figure 4.1 des interférences

¹<http://data.mohid.com/index.xml>

d'ondes internes dues aux réflexions aux frontières du domaine C . Ces interférences se forment lors du *spin-up* du modèle et sont rapidement dissipées au bout de 3 jours. Il est curieux de remarquer que ce phénomène ne se produit qu'à l'intérieur du domaine C . Ceci prouve que le domaine C est capable de générer des ondes internes. Le fait que le domaine P ne produise pas ce même genre d'interférences est dû soit à une résolution insuffisante, soit à une dimension du domaine et une durée de la simulation qui sont incompatibles. Cela dit, vu que la longueur d'onde des interférences des ondes internes est estimée à $20 - 30 \text{ km}$ (proche de la longueur du premier rayon de déformation baroclinique de Rossby), il est probable que le domaine P ne puisse pas résoudre de phénomènes à cette échelle [34]. Ceci abonde en faveur de l'intérêt du downscaling de la solution Mercator vers des solutions côtières de plus fine résolution. Toutefois, si Mercator parvenait à se doter d'une résolution de l'ordre des 2 km (i.e. 10 fois supérieure à la longueur du premier rayon de déformation baroclinique de Rossby), on pourrait mieux se douter de l'intérêt d'un tel downscaling. À ce moment, seuls des modèles niddés avec une résolution semblable et des vents de très haute résolution (de l'ordre de 1 km), ou avec des assimilations de données *in-situ*, pourraient potentiellement améliorer l'hydrodynamique de la solution de Mercator.

Dans la figure 4.3 sont comparés les résultats de la solution Mercator d'analyse $M-O$ interpolée sur le domaine P et les résultats des domaines superposés P et C de Mohid avec une image de satellite de température à la surface de la NOAA prise le même jour à une heure inconnue. Il est difficile de faire la comparaison. En tout cas le modèle de meilleure résolution possède une plus grande variabilité spatiale et semblerait s'approcher plus de l'image de satellite.

Les champs de vitesse sont aussi comparés dans les figures 4.4 et 4.5. On peut remarquer que la circulation moyennée dans la solution du modèle P de Mohid est très semblable à la circulation instantanée de la solution du modèle $M-O$ de Mercator. Dans les deux modèles, à la surface, un courant longe la côte Ibérique et entre dans le bassin méditerranéen par le détroit de Gibraltar, alors qu'en profondeur, en moyenne, l'eau de la Méditerranée entre dans l'Atlantique pour former l'IPC (*Iberian Poleward Current*). Dans le golfe de Cádiz, en surface ainsi qu'en profondeur, on verrait la recirculation d'un courant venant des Canaries et/ou des Açores. ceci est un scénario de courants typique, comme celui qui est rencontré dans la littérature [12],[7].

Le travail de *Drillet* [17] valide la capacité de la solution Mercator d'assez bien reproduire tout le cycle de vie des médies (depuis leur formation au Cap de Saint-Vincent ou sur le banc de l'Estrémadure, jusqu'à leur dissolution dans les eaux de l'Atlantique, en passant par leur transport vers les

îles Canaries ou outre rift-Atlantique), ainsi que de reproduire les branches typiques des eaux méditerranéennes. La figure 4.7 montre bien l'évolution de la formation des eaux méditerranéennes dans le golfe de Cádiz. Commencant par du *downslopping* [15] en tant que *density-current*, la principale branche d'eau méditerranéenne se détache du fond à 700 *m* de profondeur à 8° *O* puis s'affaisse jusqu'à 1000 *m* de profondeur à 8.5° *O* (fig.4.7) où elle semble atteindre l'équilibre hydrostatique sur tout le reste de son parcours. Il est intéressant de remarquer que la branche principale semble s'entrelacer en plusieurs sous branches qui coalescent alternativement vu le nombre variable des maxima de salinité dans la zone entre les 800 *m* et 1200 *m* de profondeur (fig.4.7 et fig.4.9). Il est important de faire remarquer la présence d'une branche plus superficielle, à la profondeur de 150 *m* environ, et épaisse de 100 *m* que *Drillet* [17] présente aussi. Cette branche suit le même parcours que la branche principale, en contournant le cap Saint-Vincent et en se propageant vers le Nord, 100 *km* au large le long de la côte Ibérique (fig.4.8). Sa genèse semble se situer proche du détroit de Gibraltar où l'eau méditerranéenne se mélange très fortement avec les eaux chaudes superficielles ce qui lui permet d'atteindre une densité neutre aux alentours des 200 *m* à 50 *m* de profondeur tout en gardant un maximum local de salinité très élevé et comparable avec celui de la branche principale de l'eau méditerranéenne. Il serait intéressant de tester la sensibilité de cette branche secondaire en essayant plusieurs équations d'état de la densité. En l'occurrence, nous suivons l'équation de l'*UNESCO* avec correction de pression [28], mais des équations plus récentes comme celles de *Jackett* [22] ou *McDougall* [27] seraient intéressantes d'essayer.

La figure 4.8 montre bien l'extension le long la côte ouest de la péninsule Ibérique de la langue d'eau méditerranéenne et de ses deux branches principales, l'une à 1000 *m* de profondeur et l'autre, au-delà des 200 *m* de fond.

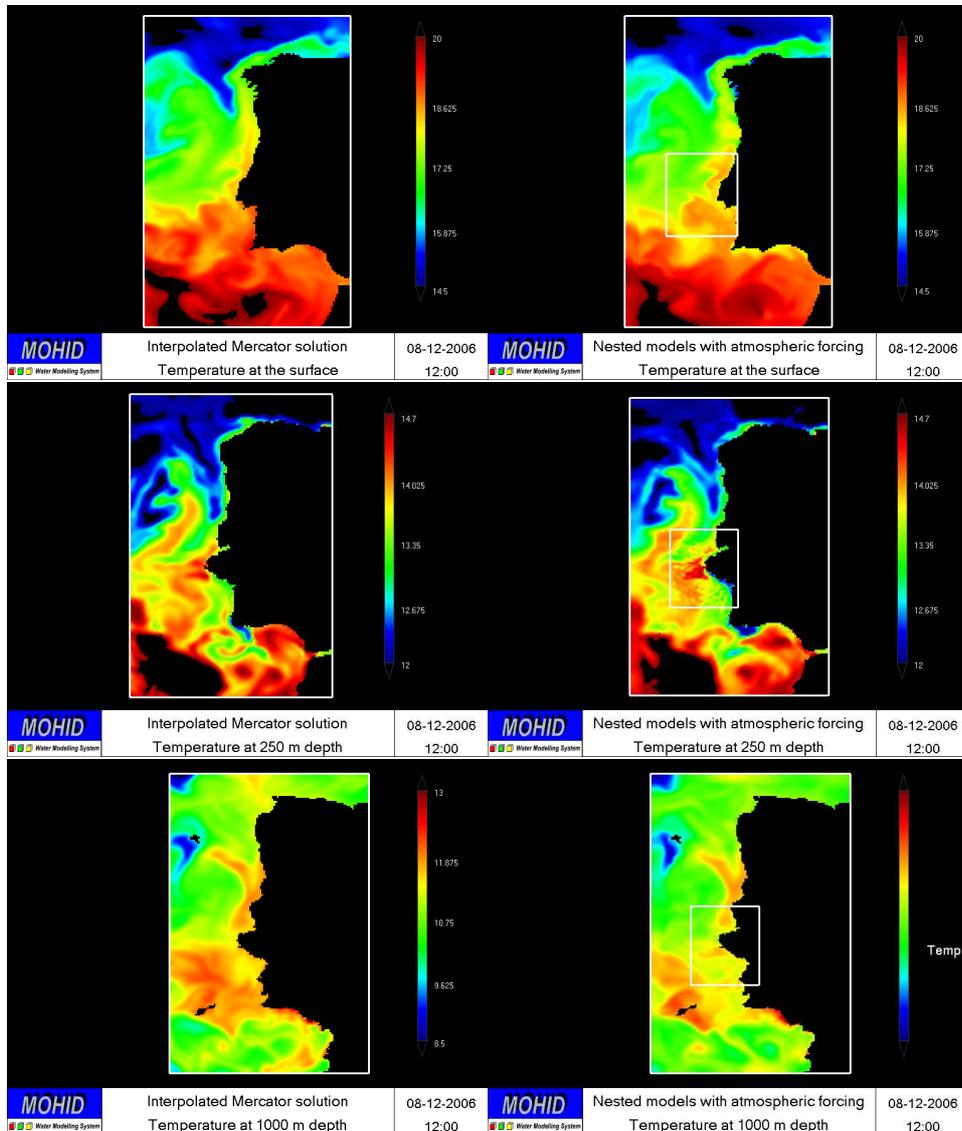


FIG. 4.1 – À gauche, les champs de température de la solution interpolée de Mercator. À droite, la superposition des champs de température du modèle de l'Estrémadure sur celui du Portugal. Les échelles de température varient dans des intervalles de $[14.5; 20.0] ^\circ C$ en surface (en haut), de $[12.0; 14.7] ^\circ C$ à 250 mètres (au milieu) et de $[8.5; 13.0] ^\circ C$ à 1000 mètres (en bas). L'outil de représentation graphique est Mohid GIS.

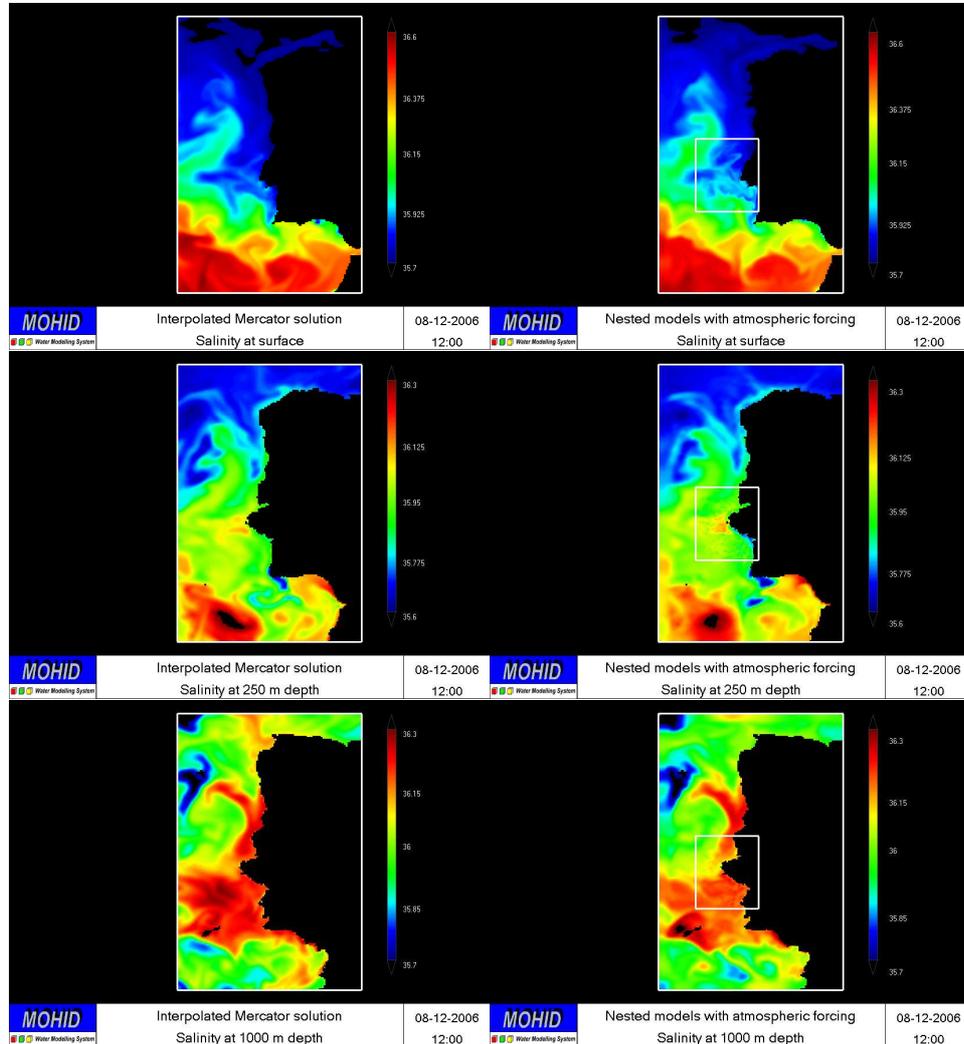
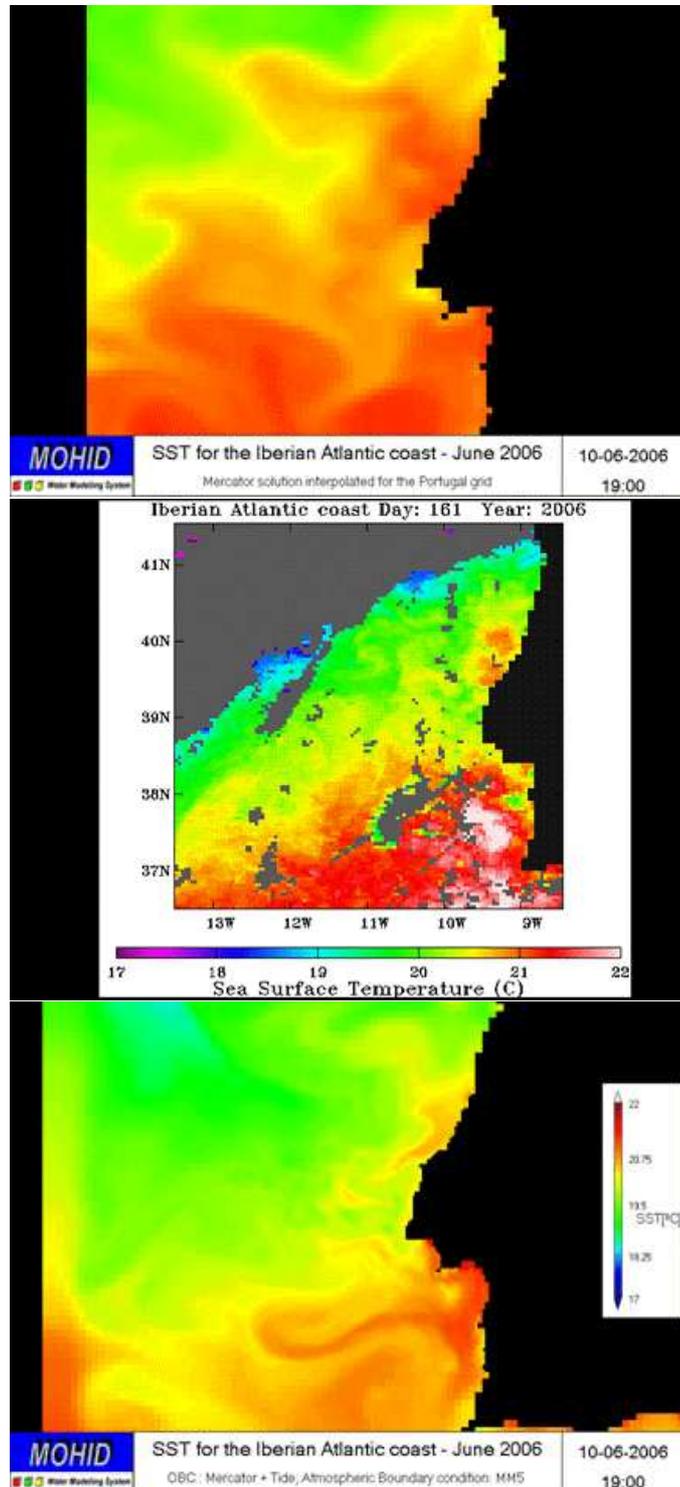


FIG. 4.2 – À gauche, les champs de salinité de la solution interpolée de Mercator. À droite, la superposition des champs de salinité du modèle de l'Éstrémadure sur celui du Portugal. Les échelles de salinité varient dans des intervalles de $[35.736.6]$ en surface (en haut), de $[35.636.3]$ à 250 mètres (au milieu) et de $[35.736.3]$ à 1000 mètres (en bas). L'outil de représentation graphique est *Mohid GIS*.



39

FIG. 4.3 – En haut le champ de température à la surface de la solution de Mercator à 19h00 le 9 Septembre 2006, au milieu une image de satellite de température à la surface de la NOAA tirée le même jour et en bas la solution de Mohid le même jour à la même heure. L'échelle des champs de température est identique et varie de $17^{\circ}C$ à $22^{\circ}C$. Toutefois il faut remarquer que la palette de couleurs entre l'image satellite et les modèles n'est pas rigoureusement la même. L'outil de représentation graphique des modèles est le *Mohid GIS*.

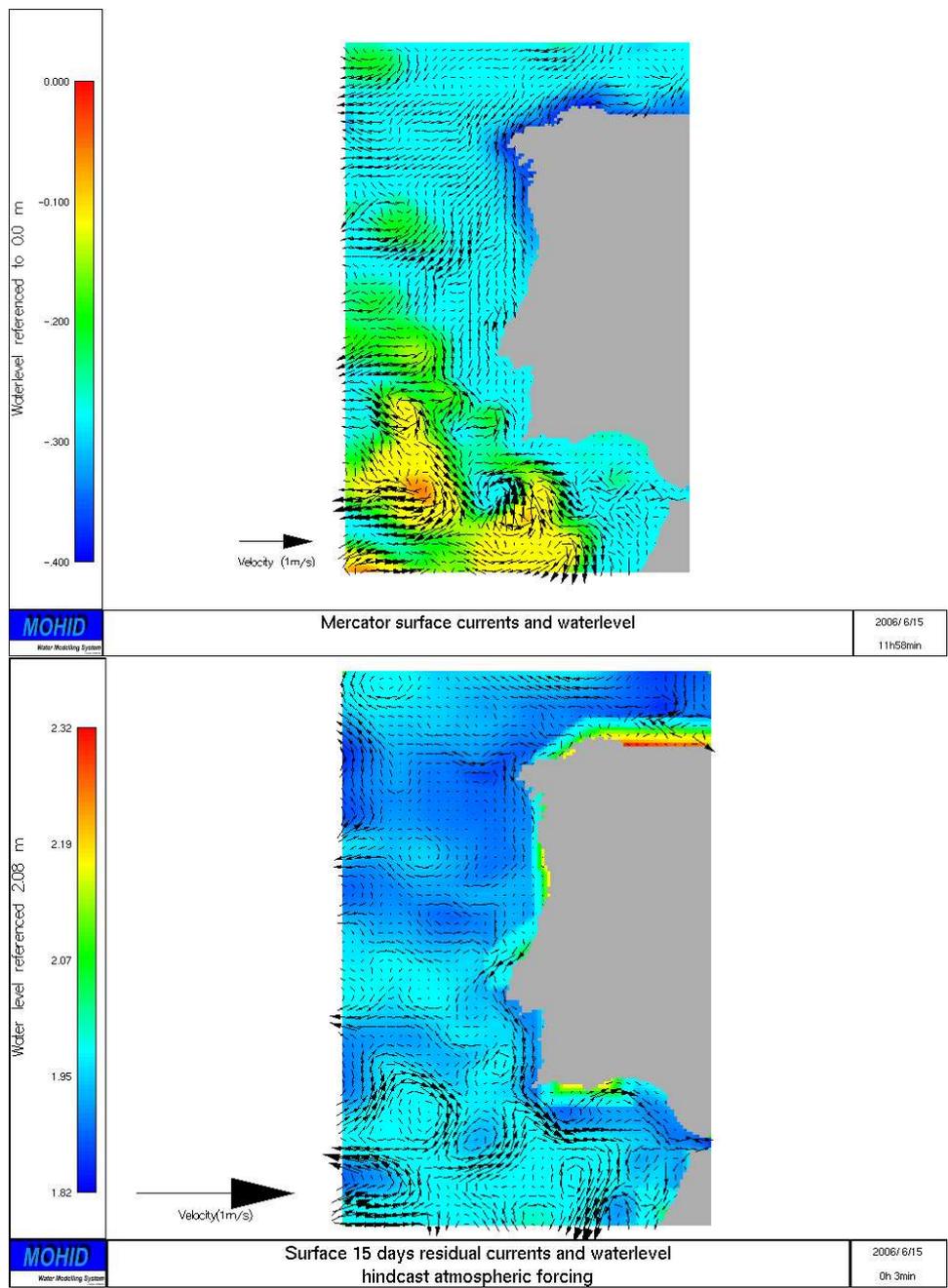


FIG. 4.4 – À gauche, les champs vectoriels instantanés des vitesses horizontales et le champ du niveau de l'eau de la solution de Mercator interpolée sur le domaine P à la surface. À droite, la moyenne des mêmes champs sur 14 jours de la solution du domaine P de Mohid. L'amplitude de la variation du niveau est de 0.4 m à gauche et de 0.50 m à droite. L'outil de représentation graphique est *Mohid Post-Processor*.

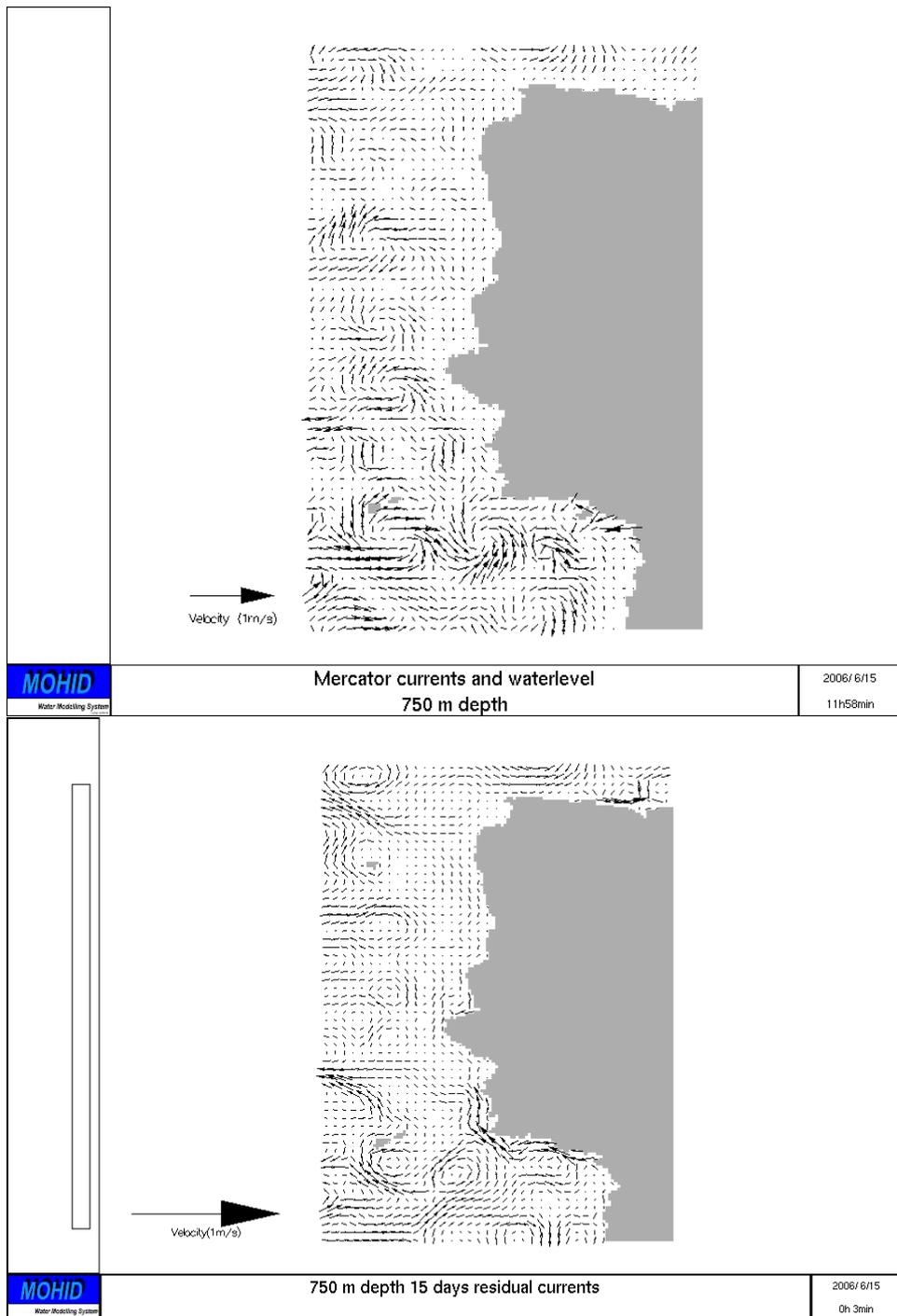


FIG. 4.5 – À gauche, les champs vectoriels instantanés des vitesses horizontales de la solution de Mercator interpolée sur le domaine P à 750 mètres de fond. À droite, la moyenne des mêmes champs sur 14 jours de la solution du domaine P de Mohid. L'outil de représentation graphique est *Mohid Post-Processor*.

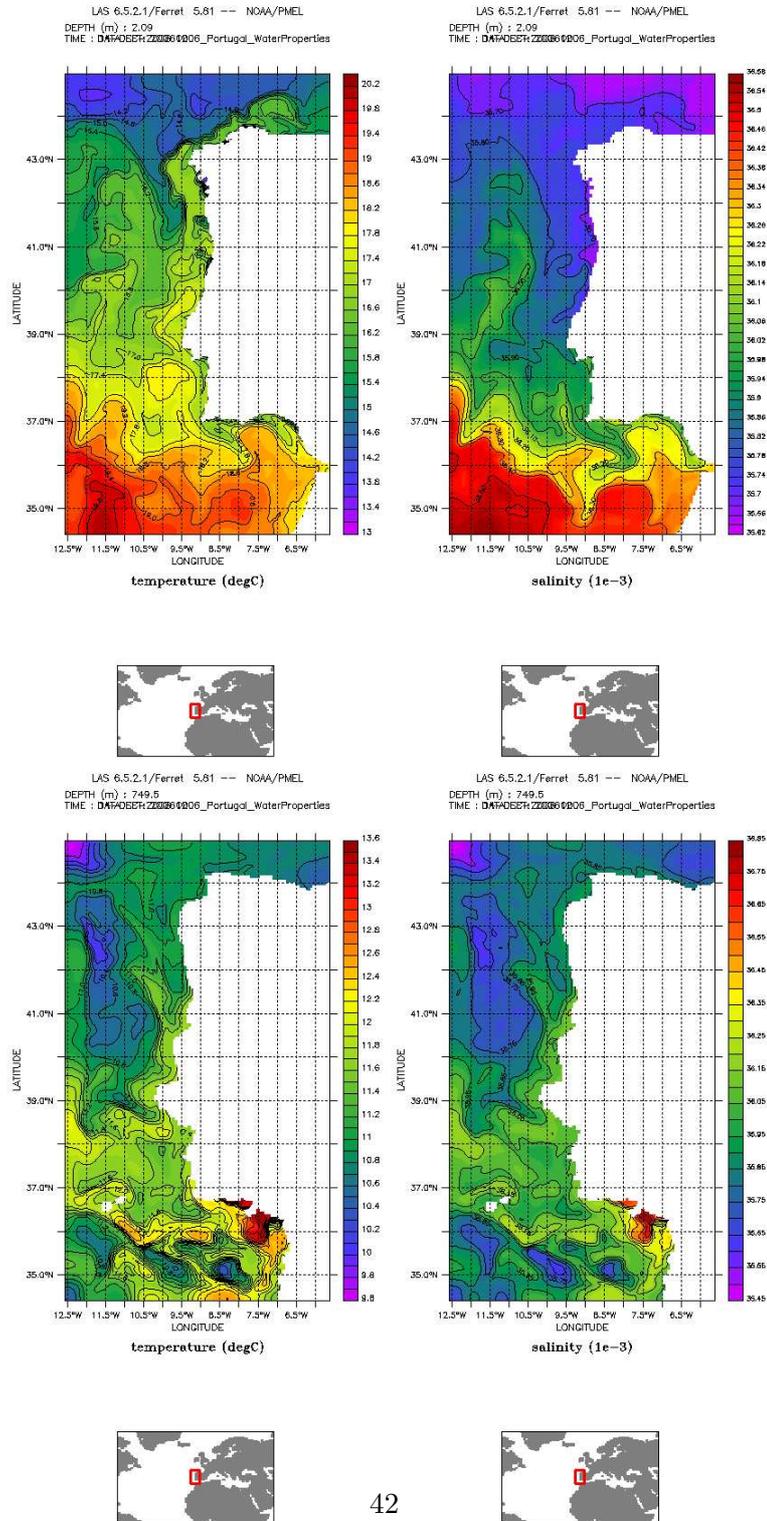


FIG. 4.6 – En haut à gauche, la température du modèle P datée du 12/12/2006 variant de 13.0°C à 20.4°C et à droite, la salinité variant de 35.62 à 36.58 à la surface. En bas à gauche, la température du modèle P variant de 9.6°C à 13.8°C et à droite, la salinité variant de 35.45 à 36.85 à 750 m de profondeur.

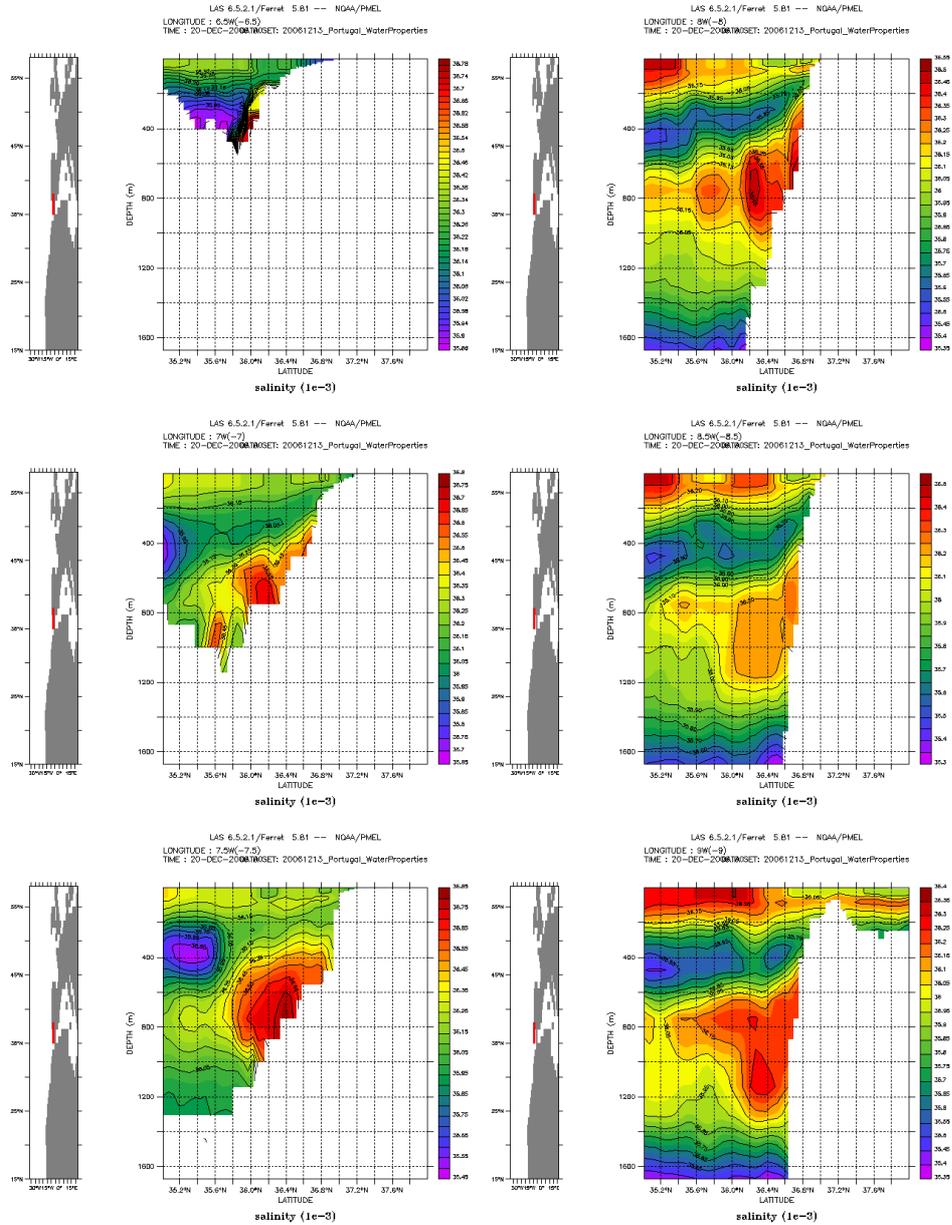


FIG. 4.7 – Lecture sur deux colonnes de haut en bas, puis de gauche à droite. Suite de sections verticales YZ datées du 20/12/2006 sur $[-8^{\circ}E - 6.5^{\circ}E]$ de la salinité du modèle P . Dans le sens de la lecture sont présentées les échelles de salinité et espace-ment des isolignes selon le modèle [minimum :espace-ment :maximum] : $[35.86 : 0.04 : 36.82]$, $[35.65 : 0.1 : 36.80]$, $[35.45 : 0.1 : 36.85]$ $[35.35 : 0.1 : 36.55]$, $[35.30 : 0.1 : 36.40]$, $[35.35 : 0.1 : 36.40]$

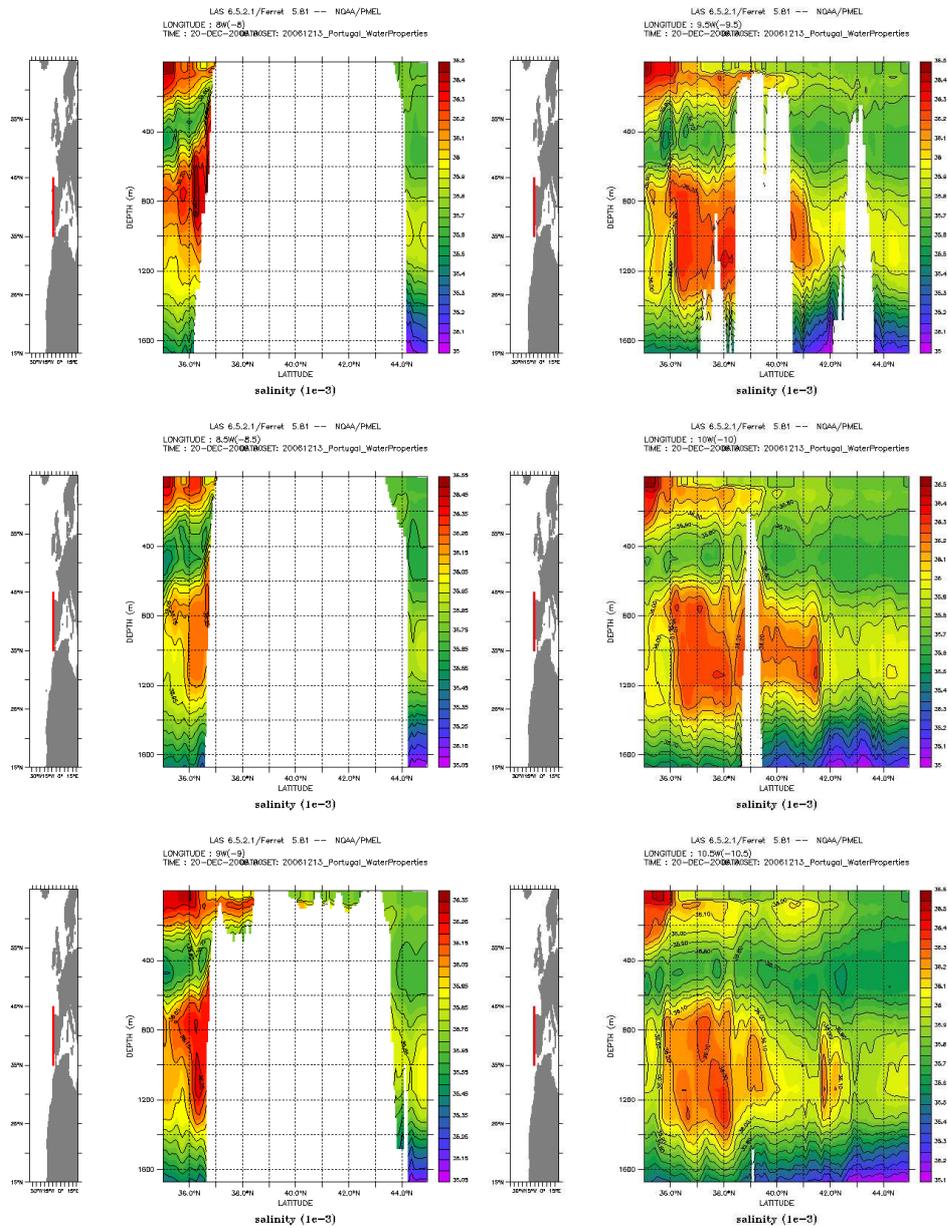


FIG. 4.8 – Lecture sur deux colonnes de haut en bas, puis de gauche à droite. Suite de sections verticales YZ datées du 20/12/2006 sur $[-10.5^{\circ}E - 8^{\circ}E]$ de la salinité du modèle P . La variation des isolignes est de 0.1. Dans le sens de la lecture sont présentées les échelles de salinité selon le modèle [minimum :maximum] : [35.036.5], [35.0536.55], [35.0536.40], [35.036.5], [35.036.5], [35.136.6]

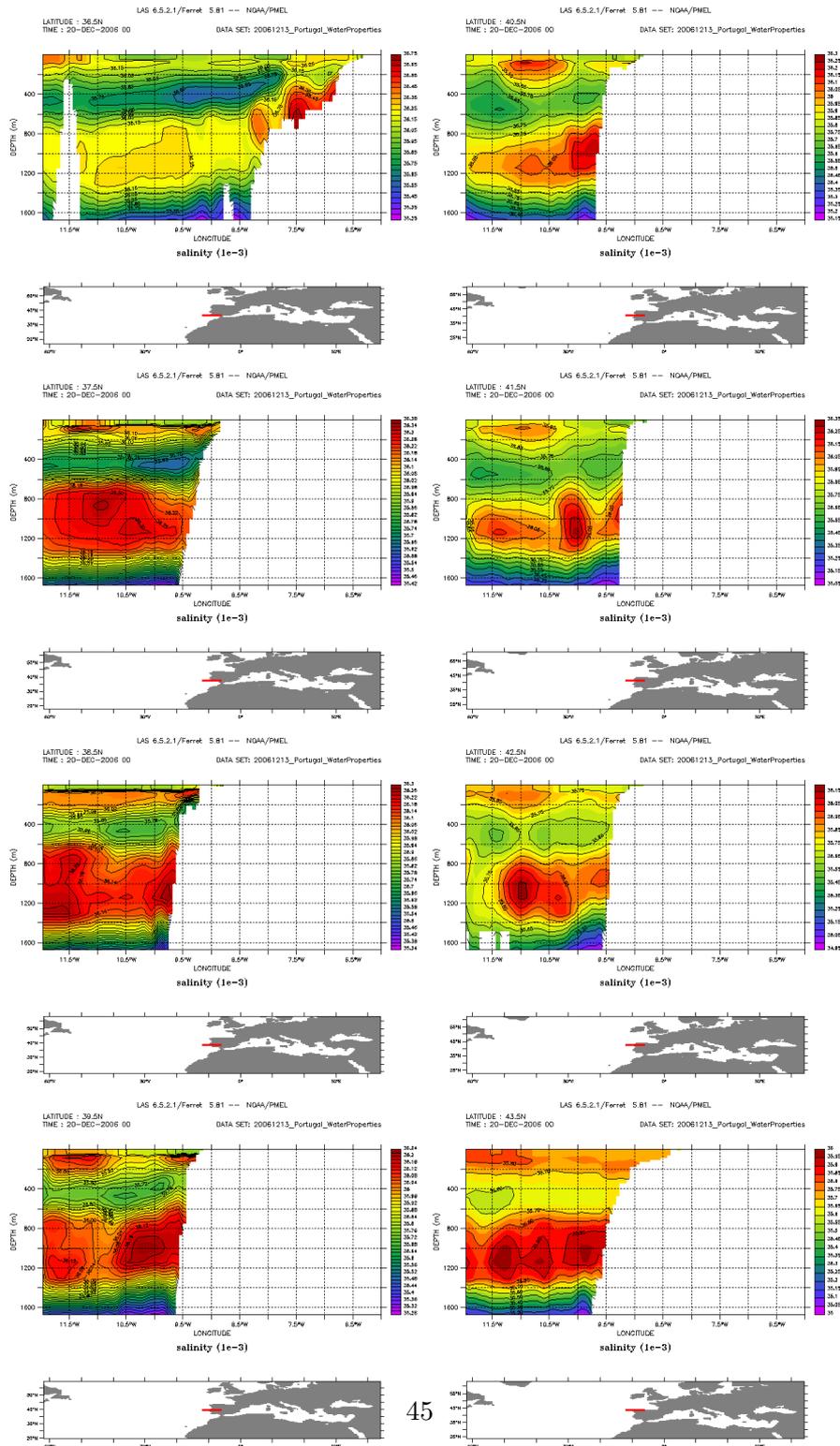


FIG. 4.9 – Lecture sur deux colonnes de haut en bas, puis de gauche à droite. Suite de sections verticales XZ datées du 20/12/2006 sur $[34.8^{\circ}N \ 38.4^{\circ}N]$ de la salinité du modèle P . Dans le sens de la lecture sont présentées les échelles de salinité et espacement des isolignes selon le modèle [minimum : espacement : maximum] : $[35.25 : 0.04 : 36.75]$, $[35.42 : 0.04 : 36.38]$, $[35.34 : 0.04 : 36.30]$, $[35.26 : 0.04 : 36.24]$, $[35.15 : 0.1 : 36.30]$, $[35.05 : 0.1 : 36.35]$, $[34.95 : 0.1 : 36.25]$, $[35.0 : 0.1 : 36.0]$

Chapitre 5

Conclusions

Nous rappelons les objectifs posés lors de la conclusion du dernier rapport [33] :

1. Avoir un gain dans la variabilité spatiale et temporelle des structures formées par les gradients de densité (instabilités, fronts).
2. Les solutions de MOHID en mode *prévision* et en mode *analyse* doivent avoir tendance à converger.
3. Avoir le système le plus automatisé possible.

Nous pouvons constater que le premier et le dernier objectif auront été correctement atteints, a priori. Dorénavant commence le travail de quantifier le gain de variabilité obtenus par l'augmentation de la résolution ainsi que la comparaison des résultats avec la solution de Mercator.

Nous tenons ainsi à tourner le modèle sur plusieurs mois en mode analyse afin de voir jusqu'où les solutions de Mercator et de Mohid divergent. Puis des comparaisons avec des données *in-situ* de CTD et de marégraphes seront tentées. Ces résultats feront le sujet d'un poster pour le congrès annuel de l'EGU¹ à Vienne en Avril 2007, puis d'un *talk* pour le congrès Ibérique de la CILAMCE² à Porto en Juin 2007 ; en fonction de l'acceptation des résumés déjà soumis.

¹<http://meetings.copernicus.org/egu2007/>

²http://cmne2007.inegi.up.pt/index_en.asp

Bibliographie

- [1] ADCROFT, A., HILL, C., AND MARSHALL, J. Representation of Topography by Shaved Cells in a Height Coordinate Ocean Model. *Monthly Weather Review* 125, 9, 2293–2315.
- [2] AMBAR, I. Physical, chemical and sedimentological aspects of the mediterranean outflow off iberia. 4137–4177.
- [3] ARAKAWA, A. Computational design for long-term numerical integration of the equations of uid motion : Two-dimensional incompressible ow. Part I. *Journal of Computational Physics* 1, 1 (1966), 119–143.
- [4] BAHUREL, P., DE MEY, P., DE PRADA, T., DOMBROWSKY, E., JOSSE, P., LE PROVOST, C., LE TRAON, P., PIACENTINI, A., AND SIEFRIDT, L. MERCATOR, forecasting global ocean. *AVISO Altimetry Newsletter* 8 (2001), 14–16.
- [5] BLAYO, E., AND DEBREU, L. Revisiting open boundary conditions from the point of view of characteristic variables. *Ocean Modelling* 9 (2005), 231–252.
- [6] BLUMBERG, A., AND KANTHA, L. Open Boundary Condition for Circulation Models. *Journal of Hydraulic Engineering* 111, 2 (1985), 237–255.
- [7] BOWER, A., SERRA, N., AND AMBAR, I. Structure of the Mediterranean Undercurrent and Mediterranean Water spreading around the southwestern Iberian Peninsula. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* 107, C10 (2002), 3161.
- [8] BRYAN, K. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. 347–376.
- [9] BURCHARD, H., AND DELEERSNIJDER, E. Stability of algebraic non-equilibrium second-order closure models. *Ocean Modelling* 3, 1 (2001), 33–50.

- [10] CANUTO, V., HOWARD, A., CHENG, Y., AND DUBOVIKOV, M. Ocean Turbulence. Part I : One-Point Closure Model Momentum and Heat Vertical Diffusivities. *Journal of Physical Oceanography* 31, 6, 1413–1426.
- [11] CHELTON, D., DESZOEKE, R., SCHLAX, M., EL NAGGAR, K., AND SIWERTZ, N. Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation. *Journal of Physical Oceanography* 28, 3, 433–460.
- [12] COELHO, H., NEVES, R., WHITE, M., LEITAO, P., AND SANTOS, A. A model for ocean circulation on the Iberian coast. *Journal of Marine Systems* 32, 1 (2002), 153–179.
- [13] CORNILLON, P., GALLAGHER, J., AND SGOUROS, T. OPeNDAP : Accessing data in a distributed, heterogeneous environment. *Data Science Journal* 2, 0 (2003), 164–174.
- [14] CRAIG, P., AND BANNER, M. Modeling Wave-Enhanced Turbulence in the Ocean Surface Layer. *Journal of Physical Oceanography* 24, 12, 2546–2559.
- [15] DELEERSNIJDER, E. Upwelling and upwelling in three-dimensional marine models. *Applied Mathematical Modelling* 13 (1989), 462–467.
- [16] DOTY, B., WIELGOSZ, J., GALLAGHER, J., AND HOLLOWAY, D. GrADS and DODS/OPeNDAP. *Proceedings of the 17th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, American Meteorological Society Albuquerque, NM* 385 (2001).
- [17] DRILLET, Y., BOURDALL’E-BADIE, R., SIEFRIDT, L., AND LE PROVOST, C. Meddies in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model. *Journal of Geophysical Research* 110, C3 (2005).
- [18] FLATHER, R. A tidal model of the northwest European continental shelf. *Mem. Soc. R. Sci. Liege* 10, 6 (1976), 141–164.
- [19] FLETCHER, C., AND SRINIVAS, K. *Computational Techniques for Fluid Dynamics 1*. Springer, 1991.
- [20] GRELL, G., DUDHIA, J., AND STAUFFER, D. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note TN-398+ STR 122 (1995).
- [21] IORGA, M., AND LOZIER, M. Signatures of the Mediterranean outflow from a North Atlantic climatology 1. Salinity and density fields. *Journal of Geophysical Research* 104, C11 (1999), 25985–26010.

- [22] JACKETT, D. R., AND MCDOUGALL, T. J. Minimal adjustment of hydrographic profiles to achieve static stability. 381–389.
- [23] KLIEM, N., AND PIETRZAK, J. On the pressure gradient error in sigma coordinate ocean models : A comparison with a laboratory experiment. *Journal of Geophysical Research* 104, C12 (1999), 29781–29800.
- [24] LEF‘EVRE, F., LYARD, F., LE PROVOST, C., AND SCHRAMA, E. FES99 : A Global Tide Finite Element Solution Assimilating Tide Gauge and Altimetric Information. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19, 9 (2002), 1345–1356.
- [25] MARTINS, H., SANTOS, A., COELHO, E., NEVES, R., AND ROSA, T. Numerical simulation of internal tides. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* 214, 6 (2000), 867–872.
- [26] MARTINSEN, E., AND ENGEDAHL, H. Implementation and testing of a lateral boundary scheme as an open boundary condition in a barotropic ocean model. *Coastal engineering* 11, 5-6 (1987), 603–627.
- [27] MCDOUGALL, T. J., JACKETT, D. R., WRIGHT, D. G., AND FEISTEL, R. Accurate and computationally efficient algorithms for potential temperature and density of seawater. 730–741.
- [28] MILLERO, F., AND POISSON, A. International one-atmosphere equation of state of seawater. *Deep-Sea Res* 28 (1981), 625–629.
- [29] P.C.LEITÃO. *Integration of Scales and Processes in the marine Environment Modelling*. PhD thesis, Technical Superior Institute, Lisbon, 2003.
- [30] PICHEVIN, T., AND NOF, D. The eddy canon. *Deep-Sea Res* 43, 9 (1996), 1475–1507.
- [31] PIETRZAK, J., JAKOBSON, J. B., BURCHARD, H., JACOB VESTED, H., AND PETERSEN, O. A three-dimensional hydrostatic model for coastal and ocean modelling using a generalised topography following co-ordinate system. *Ocean Modelling* 4, 2 (2002), 173–205.
- [32] REYNAUD, T., LEGRAND, P., MERCIER, H., AND BARNIER, B. A new analysis of hydrographic data in the Atlantic and its application to an inverse modelling study. *International WOCE Newsletter* 32 (1998), 29–31.
- [33] RIFLET, G. Premier rapport trimestriel à Mercator-Océan. Tech. rep., MARETEC, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.

- [34] STEVENS, D. On open boundary conditions for three dimensional primitive equation ocean circulation models. *Geophysical and astrophysical fluid dynamics* 51, 1-4 (1990), 103–133.