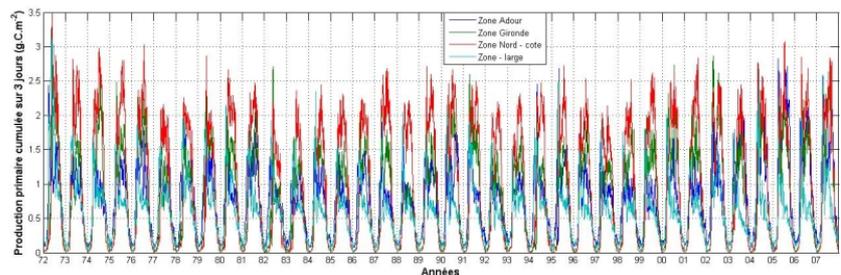
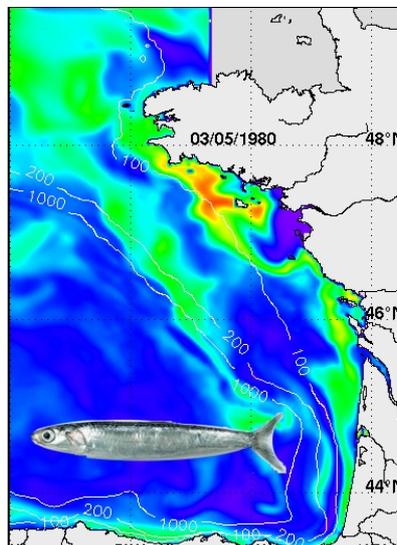


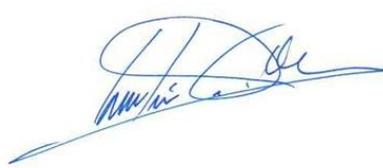
Modélisation couplée physique-biogéochimie du golfe de Gascogne sur la période 1971-2007



Modélisation couplée physique-biogéochimie du golfe de Gascogne sur la période 1971-2007

**Configuration du modèle ECO-MARS3D et
description des variables et indices
hydrologiques calculés**

Fiche documentaire

| | | |
|--|---|--|
| Numéro d'identification du rapport : R.INT.DOP/EMH/ 2009-01 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> | | date de publication : JAN 09 nombre de pages : 26 bibliographie : Oui illustration(s) : Oui langue du rapport : F |
| Validé par : André Forest et Yann-Hervé De Roeck | | |
| Titre de l'article Modélisation couplée physique-biogéochimie du golfe de Gascogne sur la période 1971-2007. Configuration du modèle ECO-MARS3D et description des variables et indices hydrologiques calculés. | | |
| Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Auteur(s) principal(aux) : Martin Huret Caroline Struski Fabien Léger | | Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer / EMH Ifremer / DYNECO |
| Cadre de la recherche : Réalisation d'une simulation couplée physique-biogéochimie du golfe de Gascogne sur la période 1972-2007 dans le cadre du projet RECLAIM | | |
| Résumé Une simulation 'hindcast' de la dynamique physique et biogéochimie du golfe de Gascogne a été réalisée pour la période 1971-2007 à l'aide du modèle ECO-MARS3D. Ce modèle couplant physique et biogéochimie fournit une série longue de données simulées, moyennées ou intégrées sur 3 jours (température, salinité, sels nutritifs, phytoplancton, zooplancton), qui sont ensuite utilisées pour des calculs d'indices hydrologiques 2D synthétiques (indices méso-échelle : stratification, upwellings, surface tourbillonnaire ; indices biologiques : chlorophylle- <i>a</i> de surface, production primaire intégrée). Nous nous proposons dans ce document de présenter la configuration et les forçages utilisés pour cette simulation, et de lister les différentes variables sauvegardées ainsi que les indices qui en sont dérivés. Les améliorations possibles pour une nouvelle simulation de cette envergure sont envisagées. Quelques résultats sous forme de cartes ou de séries temporelles sont présentés à titre illustratif. | | |
| Mots-clés Golfe de Gascogne, modélisation couplée, ECO-MARS3D, hindcast, indices hydrologiques, halieutique, projet FP6 RECLAIM. | | |
| Rédacteur Nom : M. Huret Date : 05/01/2009 Visa  | Vérificateur Nom : Y.-H. De Roeck Date : 05/01/2009 Visa  | Vérificateur Nom : A. Forest Date : 05/01/2009 Visa  |

sommaire

| | |
|---|-----------|
| Introduction..... | 6 |
| 1. Configuration du modèle et description des données..... | 7 |
| 1.1. Description du modèle hydrodynamique : MARS3D..... | 7 |
| 1.2. Description du modèle biogéochimique : ECO-MARS3D..... | 8 |
| 1.3. Forçages..... | 9 |
| 1.3.1. Données météorologiques..... | 9 |
| 1.3.2. Fleuves : débits et apports..... | 9 |
| 1.3.3. Conditions aux limites du modèle et conditions initiales..... | 11 |
| 1.4. Caractéristiques de la simulation et localisation des données..... | 11 |
| 1.5. Listes des variables..... | 12 |
| 1.5.1. Variables principales..... | 12 |
| 1.5.2. Variables secondaires..... | 13 |
| 1.6. Précautions d'usage..... | 14 |
| 1.7. Améliorations en vue d'une nouvelle simulation hindcast..... | 15 |
| 2. Les indices hydrologiques d'intérêt halieutique | 16 |
| 2.1. Liste des indices..... | 16 |
| 2.2. Calcul des indices..... | 17 |
| 2.2.1. Indices de stratification..... | 17 |
| 2.2.2. Indices de fronts..... | 18 |
| 2.2.3. Indice d'upwellings..... | 18 |
| 2.2.4. Indices de panaches..... | 18 |
| 2.2.5. Indices tourbillons..... | 19 |
| 2.2.6. Indices biologiques..... | 19 |
| 2.2.7. Autres indices | 20 |
| 3. Exemples de cartes et séries temporelles obtenues..... | 21 |
| 3.1. Exemples de cartes d'indices..... | 21 |
| 3.2. Exemples de séries temporelles..... | 22 |
| 4. Références..... | 25 |

Introduction

Une simulation 'hindcast' de la dynamique physique et biogéochimique du golfe de Gascogne a été réalisée pour la période 1971-2007 à l'aide du modèle ECO-MARS3D. Ce modèle couplant physique et biologie fournit une série à long terme de données simulées, moyennées sur 3 jours (température, salinité, phytoplancton, zooplancton, etc ...) qui sont ensuite utilisées pour des calculs d'indices hydrologiques 2D synthétiques (stratification, upwellings, surfaces tourbillonnaires, production intégrée, ...). Nous nous proposons dans ce document d'en présenter la configuration ainsi que les différentes variables calculées. Même si quelques résultats sous forme de cartes ou de séries temporelles sont présentées à titre illustratif, le but de ce document n'est pas l'analyse de la série environnementale modélisée. Pour cela, le lecteur est invité à se reporter aux différents livrables du projet RECLAIM du FP6. L'ensemble de ces données est disponible sur demande.

Ce travail s'intègre dans deux projets européens, UNCOVER (UNderstanding reCOVERY of fish stocks, FP6 - Contract 022717, <http://www.uncover.eu/>) et RECLAIM (REsolving Climate Impact on fish stocks, FP6 – Contract 044133 <http://www.climateandfish.eu/>). Pour ce dernier, la simulation rétrospective réalisée nous aide à détecter les changements environnementaux physiques et biologiques ayant eu cours lors des dernières décennies, afin d'en estimer l'impact sur les populations de poisson du golfe de Gascogne avec un focus particulier sur l'anchois. L'évaluation de ces impacts à différentes étapes du cycle de vie se fait par l'intermédiaire d'autres modèles tels que la modélisation d'habitats, le modèle IBM (Individual Based Modelling) larvaire ou encore le modèle DEB (Dynamic Energy Budget) anchois, qui utilisent les sorties de cette simulation 'hindcast'. Dans le cadre de RECLAIM sont réalisés également des simulations de projection à long terme se basant sur les scénarios de changement des forçages météorologiques prévus par le GIEC (Groupement Intergouvernemental sur les Changements Climatiques) ou de réduction des apports en sels nutritifs prévus dans le cadre d'OSPAR. Les résultats de ces scénarios ne sont pas présentés dans ce document, mais les fichiers de résultats auront la même structure que les fichiers issus du 'hindcast'.

Ce document s'articule en 3 parties :

1. La première décrit la configuration du modèle ECO-MARS3D (emprise du modèle, forçages utilisés, conditions aux limites), ainsi que les simulations réalisées (dates, stockage des données, listes des variables).
2. La seconde décrit les méthodes utilisées pour le calcul des indices hydrologiques dits 'secondaires'.
3. La dernière partie propose quelques exemples de résultats graphiques (séries temporelles, cartes moyennes) fournies pour des sous-zones du golfe de Gascogne.

1. Configuration du modèle et description des données

Le modèle utilisé est ECO-MARS3D, couplant un modèle hydrodynamique et un modèle biologique. Nous utilisons ici la version V6.20 du code, avec des calculs parallélisés en MPI sur CAPARMOR. Il s'agit de la version utilisée pour le modèle opérationnel dans le cadre de Prévimer (<http://www.previmer.org>) en 2008.

Les simulations sont réalisées sur la période janvier 1971 à Décembre 2007.

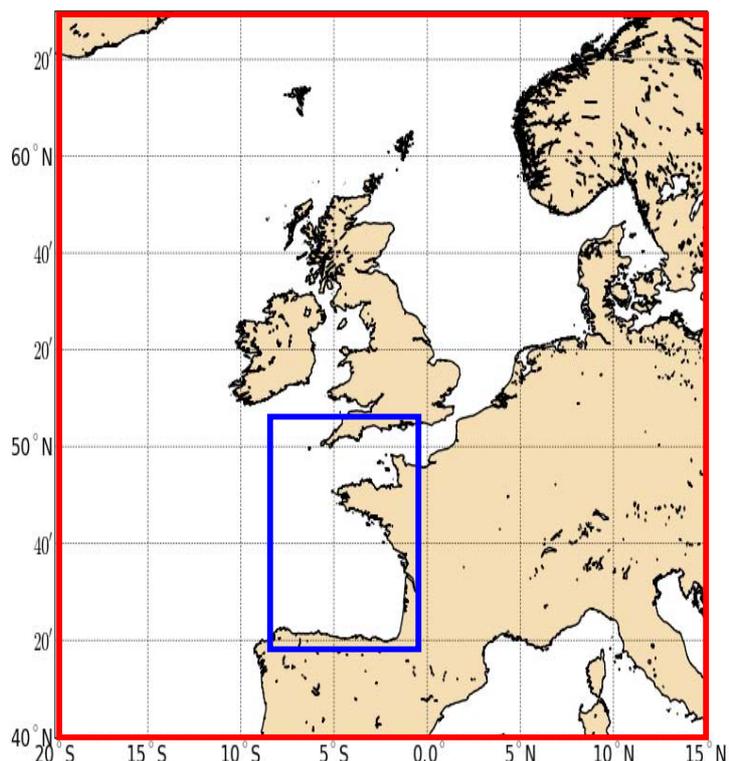


Fig.1 Emprises géographiques de MARS : en rouge, rang 2D ; en bleu, rang 3D

1.1. Description du modèle hydrodynamique : MARS3D

Le modèle hydrodynamique est décrit dans Lazure et Dumas (2008). Le lecteur peut également se référer à la documentation technique de MARS (Pérenne, 2006).

L'emprise du modèle 3D GDGE couvre le Golfe de Gascogne ainsi que la Manche ouest (43.2°N-50.8°N / 8°W-0.4°W ; cf. Figure 1). La grille est régulière avec une maille d'environ 4 kilomètres. La discrétisation verticale est faite en coordonnées sigma avec 30 niveaux et une distribution des couches plus dense en surface. La bathymétrie provient du SHOM (Service Hydrologique et Océanographique de la Marine).

Aux limites ouvertes, le modèle 3D utilise des conditions calculées par un modèle 2D barotrope de plus grande emprise allant du Portugal à l'Islande (40°N-65°N / 20°W-15°E ; cf. Figure 1 et Lazure et Dumas (2008) pour plus de détails). L'élévation de la surface libre est fournie au modèle 3D par le modèle 2D.

Les flux de chaleur empiriques sont calculés à partir des données météorologiques issues de la réanalyse ERA du Centre de Météorologie Européen et du modèle ARPEGE de Météo France (cf. paragraphe 1.3.1). Les apports en eau douce de la Loire, la Gironde, l'Adour et la Vilaine sont pris en compte dans le modèle (cf. paragraphe 1.3.2).

1.2. Description du modèle biogéochimique : ECO-MARS3D

Le modèle ECOMARS-3D couple un module de biologie de type NPZD au modèle de physique MARS-3D. Il permet de prévoir les concentrations de nutriments et de plancton. Le modèle résulte de travaux effectués à l'Ifremer soit à l'échelle de tout le plateau continental français du golfe de Gascogne (thèses de doctorat de Loyer (2001) et Huret (2005a)), soit aux échelles locales de la Rade de Brest (Le Pape et Ménesguen, 1997, Le Pape et al., 1999, Ménesguen et al., 2006) et de la baie de Vilaine (Chapelle et al., 1994). Ce modèle d'écosystème pélagique restant très simple il ne peut prétendre simuler tous les événements phytoplanctoniques multiples et fugaces signalés par l'imagerie satellitaire. Il vise à reproduire certaines des grandes tendances et à en fournir une explication dynamique.

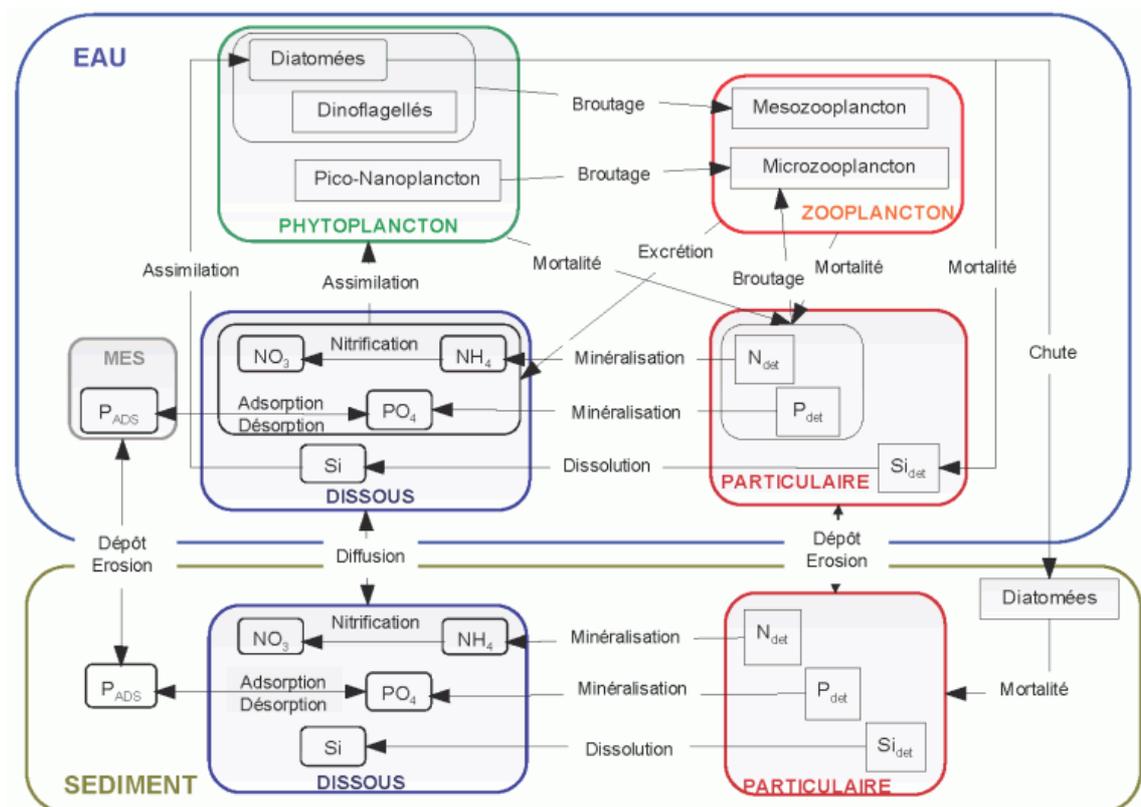


Fig.2. Schéma conceptuel du modèle biogéochimique.

La Figure 2 détaille les différents compartiments biologiques modélisés. Les équations sont décrites dans Huret (2005b). Dans le cadre de notre longue simulation, le sédiment et les compartiments associés ne sont pas pris en compte. Les raisons en sont le manque de connaissances des processus associés à l'échelle du golfe de Gascogne, ainsi que les possibles dérives engendrées sur de longues simulations (accumulation de matière et relargage parfois irréaliste du sédiment vers la colonne d'eau).

Pour estimer correctement l'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau, les matières minérales en suspension (MES) sont imposées d'après une climatologie mensuelle des images satellitales de turbidité des années passées (Gohin *et al.* 2007).

1.3. Forçages

1.3.1. Données météorologiques

Les données météorologiques sont issues de la réanalyse ERA-40 du Centre Européen de Météorologie (ECMWF) pour les années allant jusque 2001, et du modèle ARPEGE de Météo France pour la suite de la série.

Dans les deux cas les fichiers contiennent 4 données par jour, et les informations suivantes sont utilisées : la pression atmosphérique au niveau de la mer, la vitesse du vent à 10m, la température de l'air à 2m, l'humidité relative et la couverture nuageuse.

Fichier ERA :

Emprise : 39.375°N – 60.75°N / 20.25°W – 15.75°E

Résolution : 1.125° en latitude et longitude

Période couverte : du 01/01/1958 au 31/08/2002

Fichier ARPEGE :

Emprise : 40°N – 65°N / 20°W – 15°E

Résolution : 0.5° en latitude et longitude

Période couverte : du 01/01/1995 au 15/09/2008

Remarque : les données de couverture nuageuse ne sont pas disponibles entre le 11/07/1999 et le 20/07/1999, et entre le 01/09/1999 et le 10/09/1999.

1.3.2. Fleuves : débits et apports

Débits :

Les fleuves pris en compte dans le modèle sont : la Loire, la Gironde, la Vilaine et l'Adour.

Les débits sont journaliers. Sur la période 1971-2007, les débits moyens pour ces 4 fleuves sont de 905 m³.s⁻¹ pour la Loire, 900 m³.s⁻¹ pour la Gironde, 71 m³.s⁻¹ pour la Vilaine et 298 m³.s⁻¹ pour l'Adour.

Remarque : les débits de la Vilaine ne sont pas disponibles pour l'année 1973.

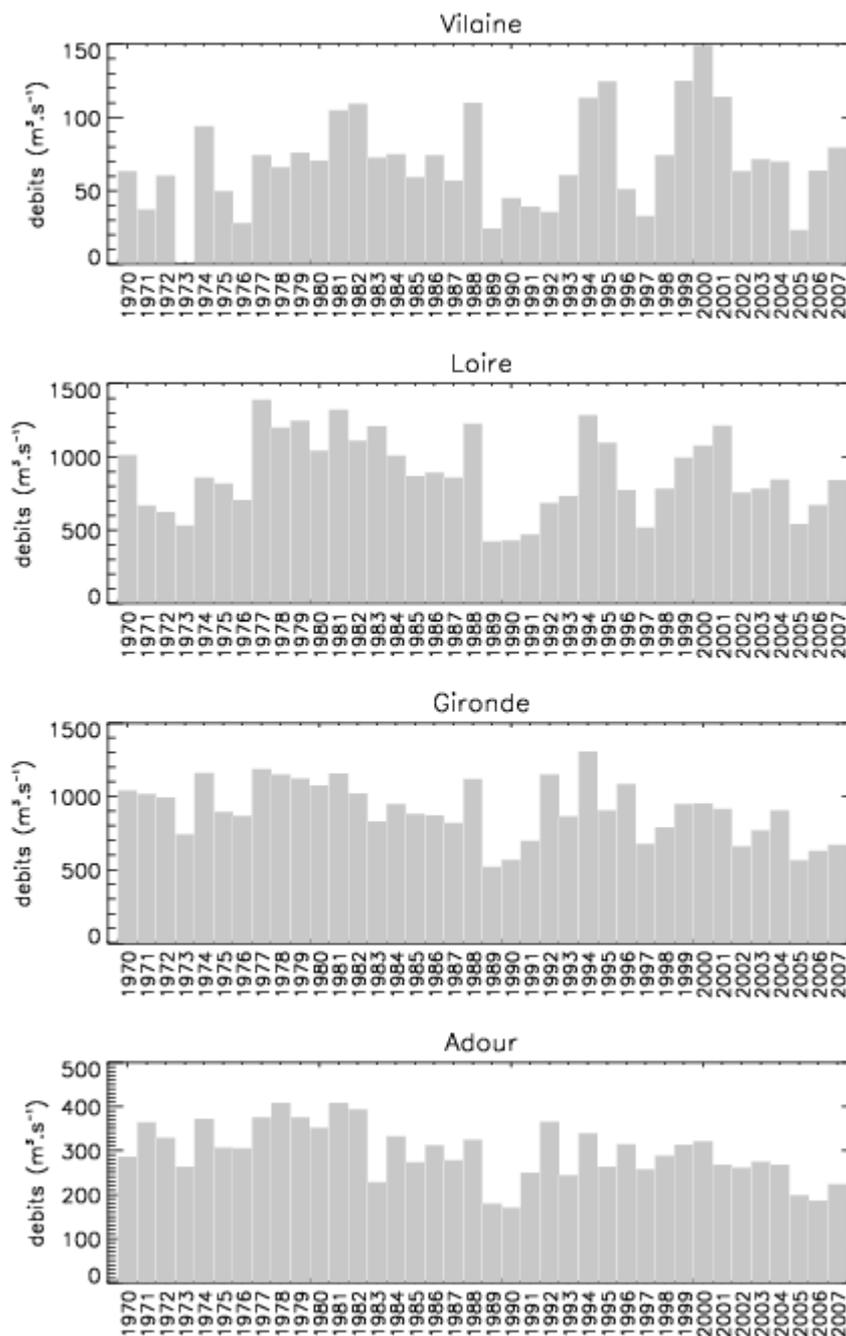


Fig.3. Débits moyens annuels (en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pour les 4 fleuves utilisés dans le modèle.

Apports :

Pour les 4 fleuves, les concentrations en ammonium, nitrate, azote détritique, silicium dissous, phosphates dissous, phosphates détritiques et matières en suspension sont pris en compte. Les apports en sels nutritifs sous leur forme dissoute et organique sont

calculés à partir de formules statistiques établies sur les séries de mesures disponibles auprès des Agences de l'eau concernées pour les années passées (Guillaud, 2008).

1.3.3. Conditions aux limites du modèle et conditions initiales

Aux limites ouvertes Nord, Ouest et Est du modèle 3D une climatologie identique est appliquée pour toutes les années simulées. Cette climatologie comprend : température, salinité, nitrates, phosphates, silicates, chlorophylle convertie en différents compartiments phytoplanctoniques.

Pour la température et la salinité, une climatologie saisonnière est appliquée (Reynaud et al. 1998).

Pour les variables biologiques, la climatologie saisonnière issu de l'Atlas Levitus (Levitus *et al.* 1998) est appliquée pour la chlorophylle *a* et les sels nutritifs.

Le fichier de conditions initiales pour la première simulation contient ces mêmes paramètres pour l'ensemble du domaine.

1.4. Caractéristiques de la simulation et localisation des données

Pas de temps de sauvegarde : 3 jours (données moyennées ou cumulées, cf. tableaux 1 et 2)

Remarque : par défaut, la version 6.20 de MARS enregistre des données instantanées. Une adaptation de la routine « output.F90 » a donc été programmée avec un contrôle avec/sans moyenne grâce à la clé de compilation « -Dkey_ecriflu ». On utilise le pas de temps des sorties (paramètre « pasor » dans le « output.dat ») comme pas de temps de moyennage.

Dates de simulation :

Avec les données ERA : du 01/01/1971 au 31/12/2001

Avec les données ARPEGE : du 01/01/2001 au 31/12/2007

Pour chaque année, les données sont sauvegardées au moins entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre (plus quelques jours avant ou après selon les fichiers).

Remarque : l'année 1971 permet la stabilisation du modèle. Il est déconseillé d'utiliser les résultats de cette année.

Format de sauvegarde : NetCDF

Répertoire de sauvegarde :

– Fichiers résultats :

/home1/environ/modele/hindcast/GDGE/

Fichiers de reprises :

/home1/environ/modele/hindcast/GDGE/savefiles/save_dec/

Noms des fichiers de résultats :

Il y a 2 fichiers de résultats par année :

4.YYYY_GDGE_previ.nc.all pour les « variables principales » (cf. tableau 1)

5.YYYY_GDGE_previ_diag.nc.all pour les « variables diagnostiques » (cf. tableau 2)

Remarque : lorsque le fichier ARPEGE a été utilisé comme forçage météorologique, le nom des fichiers résultats est sous la forme : **YYYY_ARP_GDGE_previ.nc.all**

Noms des fichiers de reprise :

sous la forme **save_YYYYMMDDHHMMSS.nc**

Remarque : lorsque le fichier ARPEGE a été utilisé comme forçage météorologique, le nom des fichiers de reprise est sous la forme : **save_ARP_YYYYMMDDHHMMSS.nc**

1.5. Listes des variables

1.5.1. Variables principales

Le tableau ci-dessous récapitule les variables enregistrées dans les fichiers de type **YYYY_GDGE_previ.nc.all**

Tableau 1. Liste des variables principales

| Nom dans le fichier | Description | Dimension | Unités | Valeur défaut |
|---------------------|--|-----------------|-------------------------------------|---------------|
| lat | Latitude | lat = 213 | Degrés nord | |
| lon | Longitude | long = 148 | Degrés est | |
| time | Secondes depuis la date origine | time = 123 | secondes depuis 1900-01-1 00:00:0.0 | |
| SIG | Niveaux sigma | z | | |
| H0 | bathymétrie par rapport au niv moyen | lat/long | m | -999 |
| hx | bathymétrie hx par rapport au niv moyen | lat/long | m | -999.01 |
| hy | bathymétrie hy par rapport au niv moyen | lat/long | m | -999.01 |
| xe | élévation de la surface libre | time/lat/long | m | 999 |
| u | composante zonale du courant barotrope | time/lat/long | m.s ⁻¹ | 0 |
| v | composante meridienne du courant barotrope | time/lat/long | m.s ⁻¹ | 0 |
| uz | composante zonale du courant | time/lat/long | m.s ⁻¹ | 0 |
| vz | composante meridienne du courant | time/lat/long | m.s ⁻¹ | 0 |
| sal | salinité | time/z/lat/long | psu | 999 |
| temp | température | time/z/lat/long | ° Celsius | 999 |
| MES | [MES] | time/z/lat/long | (g.l ⁻¹) | 999 |
| azote_des_diatoms | [azote] des diatomées | time/z/lat/long | (μmoleN.l ⁻¹) | 999 |

| | | | | |
|-------------------|---|-----------------|--|-----|
| azote_des_dinofla | [azote] des dinoflagellés | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleN.l}^{-1}$) | 999 |
| nanopicoplancton | [azote] du nanopicoplancton | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleN.l}^{-1}$) | 999 |
| mesozooplancton | [azote] du mesozooplancton | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleN.l}^{-1}$) | 999 |
| microzooplancton | [azote] du microzooplancton | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleN.l}^{-1}$) | 999 |
| nitrate | [nitrate] | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleN.l}^{-1}$) | 999 |
| silicium_dissous | [silicium] | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleSi.l}^{-1}$) | 999 |
| phosphate_dissous | [phosphates] | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleP.l}^{-1}$) | 999 |
| ammonium | [ammonium] | time/z/lat/long | ($\mu\text{moleN.l}^{-1}$) | 999 |
| prod_cum_diatoms | Production cumulée des diatomées | time/z/lat/long | gN.m^{-2} depuis le 1er janvier | 999 |
| prod_cum_dinofla | Production cumulée des dinoflagellés | time/z/lat/long | gN.m^{-2} depuis le 1er janvier | 999 |
| prod_cum_nanoi | Production cumulée du pico-nanoplancton | time/z/lat/long | gN.m^{-2} depuis le 1er janvier | 999 |

1.5.2. Variables secondaires

Le tableau ci-dessous récapitule les variables enregistrées dans les fichiers de type **YYYY_GDGE_previ_diag.nc.all**

Tableau 2. Liste des variables secondaires

| NOM dans fichier | Description | Dimension | Unités | Valeur défaut |
|----------------------|--|-----------------|---|---------------|
| lat | Latitude | lat = 213 | Degrés nord | |
| lon | Longitude | long = 148 | Degrés est | |
| time | Secondes depuis la date origine | time = 123 | y | |
| z | sigma | z = 30 | level | |
| effet_lumiere_diat | Limitation par la lumière sur diatomées | time/z/lat/long | (su) | 999 |
| effet_azote_diat | Limitation par l'azote sur diatomées | time/z/lat/long | (su) | 999 |
| effet_silice_diat | Limitation par la silice sur diatomées | time/z/lat/long | (su) | 999 |
| effet_phosp_diat | Limitation par les phosphates sur diatomées | time/z/lat/long | (su) | 999 |
| effet_lumiere_dino | Limitation par la lumière sur dinoflagellés | time/z/lat/long | (su) | 999 |
| extinction_lumineuse | extinction_lumineuse | time/z/lat/long | (m^{-1}) | 999 |
| prod_diat_diag | Production intégrée et cumulée des diatomées | time/lat/long | (gN.m^{-2}) depuis 1 ^{er} janvier | 999 |
| prod_dino_diag | Production intégrée et cumulée des dinoflagellés | time/lat/long | (gN.m^{-2}) depuis 1 ^{er} janvier | 999 |

| | | | | |
|---------------------|--|-----------------|--|-----|
| | | | janvier | |
| prod_nano_diag | Production intégrée et cumulée du piconanoplancton | time/lat/long | (gN.m ⁻²) depuis 1 ^{er} janvier | 999 |
| chlorophylle_a | Chlorophylle <i>a</i> | time/z/lat/long | (µgChl-a.l ⁻¹) | 999 |
| prod_cumul_chl_diag | Production intégrée et cumulée totale | time/lat/long | (gC.m ⁻²) depuis 1 ^{er} janvier | 999 |

1.6. Précautions d'usage

Nous rappelons ici que le modèle utilisé est un outil de représentation de la dynamique d'un écosystème pélagique complexe. L'ensemble des processus ou compartiments biologiques ne peuvent être représentés et sont pas conséquent simplifiés ou agrégés. L'échelle utilisée, encore relativement grossière (4km) pour certaines zones à forts gradients, est également un élément limitant la dynamique que l'on est capable de restituer. Par conséquent notre modèle, bien que représentant correctement la dynamique saisonnière, ne peut prétendre simuler tous les événements phytoplanctoniques multiples et fugaces signalés par exemple par l'imagerie satellitaire. Il vise principalement à reproduire certaines des grandes tendances et à en fournir une explication dynamique.

L'année 1971, bien que proposée ici, doit plutôt être considérée comme une année de 'spin-up', c'est à dire servant à la stabilisation du modèle et fortement dépendante des conditions initiales qui ne sont pas celles de la fin de l'année 1970 mais celles d'une climatologie (cf. 1.3.3). Plus on s'éloigne de cette première année de simulation, moins les conditions initiales auront d'influence.

Les forçages sont cohérents sur l'ensemble des 37 ans de simulation, c'est à dire provenant d'une même source, excepté le forçage météorologique. Le passage du modèle ERA vers le modèle ARPEGE entre 2001 et 2002 pourrait avoir un impact sur certains compartiments de l'écosystème pélagique modélisés. La variabilité, notamment du fait du changement d'échelle, est inévitablement plus importante avec ARPEGE. Ceci peut porter préjudice lors d'une analyse des changements dans la série. Nous prévoyons à cet effet une comparaison de deux simulations réalisées avec les forçages de chacun des modèles disponibles sur une période commune 1996-2001. Si des différences notables sont perçues, une dégradation de la résolution des forçages ARPEGE vers la résolution de ERA est à prévoir sur les dernières années afin d'obtenir une série de forçage atmosphérique cohérente.

Les apports en sels nutritifs par les fleuves sont calculés à partir d'une relation les liant aux débits à laquelle s'ajoute une tendance d'évolution, liée à l'augmentation des nitrates au cours des dernières décennies, et à une augmentation puis une diminution des phosphates sur cette même période. Cette relation a été construite sur les années pendant lesquelles de telles données étaient disponibles, c'est à dire principalement à partir des années 1980. L'extension de cette relation et notamment de la tendance aux années antérieures est donc à prendre avec précaution.

1.7. Améliorations en vue d'une nouvelle simulation hindcast

Certaines quantités n'ont pas été préalablement retenues pour être sauvegardées lors de cette simulation et se sont pourtant avérés ensuite présenter un intérêt pour les utilisateurs. Ces grandeurs devraient être retenues dans le cadre d'une future simulation. Il s'agit pour la biologie des termes de broutage du zooplancton, permettant de mesurer la production secondaire.

Pour la physique la tension de fond, avec prise en compte de l'effet des vagues, est également intéressante pour les études portant sur le benthos et la définition des habitats. Et plus que la tension de fond moyenne sur une période de sauvegarde (3 jours ici), la tension maximale au cours de cette période est sans doute la variable la plus limitante en terme d'habitat et donc intéressante à sauvegarder.

Les conditions aux limites sont fournies par une climatologie. Un forçage plus réaliste présentant une variabilité interannuelle est à prévoir. Celui-ci peut provenir d'un modèle couplé physique-biologie couvrant une zone beaucoup plus large. Cette possibilité est dorénavant possible avec le modèle ORCA pour les variables physiques (température, salinité, élévation) depuis la version 6.25 de MARS.

Notons qu'un effort continu de validation est réalisé, en parallèle au développement et à l'amélioration de la paramétrisation des modèles physique et biologique. Lazure *et al.* (2009) s'intéresse à la validation de la partie physique de MARS sur le golfe de Gascogne. Les travaux successifs réalisés sur la partie biogéochimique à l'échelle du golfe de Gascogne (Loyer, 2001 ; Huret *et al.* 2007) ont permis de la calibrer et/ou valider en utilisant à la fois les données de campagne à la mer (sels nutritifs, chlorophylle,...) et les données satellitales de «couleur de l'eau». Par ailleurs des travaux sont en cours sur l'amélioration de la paramétrisation du compartiment zooplancton du modèle biologique.

Finalement, la configuration MANGA de MARS couvrant l'ensemble du domaine Manche + golfe de Gascogne étant maintenant opérationnelle, il est envisageable de l'utiliser pour une prochaine simulation hindcast.

2. Les indices hydrologiques d'intérêt halieutique

Les indices sont listés dans le tableau 3 et explicités ensuite. Ils sont calculés à partir des variables listées dans les tableau 1 et 2. Par conséquent les valeurs des indices correspondent à des moyennes ou des intégrations sur 3 jours. Les fichiers contiennent également 123 pas de temps, 122 compris dans l'année spécifiée dans le nom du fichier, et une l'année suivante. La résolution spatiale reste la même que celle des fichiers de variables brutes, mais l'extension spatiale a par contre été réduite. La zone couverte s'étend dans ces nouveaux fichiers de 43.2°N-49.6°N / 7°W- 0.4°W, ce qui représente une grille de 127 par 180.

La profondeur maximale considérée pour le calcul des indices lorsque ceux-ci sont intégrés sur la verticale (sauf la production primaire intégrée sur toute la colonne d'eau) ou lors de la recherche de gradients maximum est 60m.

2.1. Liste des indices

Tableau 3. Liste des indices hydrologiques. La profondeur indiquée correspond à la profondeur à laquelle a été calculé l'indice.

| n° | Indices bruts | Unités |
|----|---|-------------------------------------|
| | Indices « stratification » | |
| 1 | Déficit d'énergie potentielle | kg.m ⁻¹ .s ⁻² |
| 2 | Déficit d'énergie potentielle (lié à la température) | kg.m ⁻¹ .s ⁻² |
| 3 | Gradient maximum verticale en densité | kg.m ⁻³ .m ⁻¹ |
| 4 | Gradient maximum verticale en température | °C.m ⁻¹ |
| 5 | Profondeur de la thermocline | m |
| 6 | Profondeur de la pycnocline | m |
| 7 | Profondeur de la halocline | m |
| | Indices « fronts » | |
| 8 | Front thermique (énergie potentielle) | kg.m ⁻² .s ⁻² |
| 9 | Front densité (énergie potentielle) | kg.m ⁻² .s ⁻² |
| 10 | Front thermique (gradient max) | °C.m ⁻² |
| 11 | Front densité (gradient max) | kg.m ⁻³ .m ⁻² |
| | Indices « upwelling » | |
| 12 | Vitesse verticale en coordonnées σ | s ⁻¹ |
| 13 | Vitesse verticale en coordonnées z | m.jr ⁻¹ |
| | Indices « panaches fluviaux » | |
| 14 | Salinité de surface (3m) | - |
| 15 | Hauteur équivalente d'eau douce | m |
| | Indices « tourbillons » | |
| 16 | Vorticité (10m) | s ⁻¹ |
| 17 | Okubo-Weiss (10m) | s ⁻² |
| | Indices « biologiques » | |
| 18 | Concentration chlorophylle (chl _a) en surface (3m) | mgChl _a .m ⁻³ |
| 19 | Production primaire intégrée sur la colonne d'eau et cumulée sur 3 jours. | gC.m ⁻² |

| Autres indices | | |
|----------------|--|-------------------|
| 20 | Température de surface (3m) | °C |
| 21 | Température de fond | °C |
| 22 | Composante horizontale du courant de surface U (10m) | m.s ⁻¹ |
| 23 | Composante horizontale du courant de surface V (10m) | m.s ⁻¹ |

Répertoire de sauvegarde :

– Fichiers résultats :

/home1/environ/modele/hindcast/indice_hydro/

2.2. Calcul des indices

2.2.1. Indices de stratification

Déficit d'énergie potentielle

Le déficit d'énergie potentielle correspond à l'énergie nécessaire pour homogénéiser en densité la colonne d'eau.

$$Depot = \frac{1}{H_0 + \xi} \int_{-H_0}^{\xi} (\bar{\rho} - \rho_z) g z dz$$

avec $\bar{\rho}$ la masse volumique moyenne sur la colonne d'eau, $\bar{\rho} = \frac{1}{H_0 + \xi} \int_{-H_0}^{\xi} \rho_z dz$, ρ_z la masse volumique à la profondeur z , H_0 la bathymétrie et ξ la hauteur de la surface libre.

La masse volumique est calculée comme une fonction de la température et de la salinité $\rho = \rho_0 (1 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0))$,

Ou seulement de la température $\rho = \rho_0 (1 - \alpha(T - T_0))$, dans le cas où l'on ne s'intéresse qu'à la stratification thermique.

avec $\rho_0 / T_0 / S_0$ la masse volumique/température/salinité de référence.

$\rho_0 = 1027.0 \text{ kg.m}^{-3}$, densité de référence,

$T_0 = 10.0^\circ\text{C}$, température de référence,

$S_0 = 35.5$, salinité de référence,

$\alpha = 0.00016$ et $\beta = 0.0008$

Gradient vertical maximum

L'indice de stratification correspond dans ce cas, au gradient maximum en température (ou densité) sur la verticale.

$$StratT = \max(GradT_k)$$

$$StratD = \max(GradD_k)$$

avec $GradT_k = \frac{T_{k+1} - T_k}{dz_k}$

$GradD_k = \frac{\rho_{k+1} - \rho_k}{dz_k}$

Profondeur de la thermocline/pycnocline

La profondeur de la thermocline est définie comme la profondeur du gradient maximum en température. Elle est calculée pour des valeurs de stratification supérieures à une valeur seuil. De même pour la pycnocline (densité) et halocline (salinité).

- seuilT = 0.15°C.m⁻¹, valeur seuil du gradient de température,
- seuilD = 0.05 kg.m⁻³.m⁻¹, valeur seuil du gradient de densité,
- seuilS = 0.1 m⁻¹, valeur seuil du gradient de salinité,

2.2.2. Indices de fronts

L'indice de l'activité frontale est calculé comme le gradient maximum horizontal de l'indice de stratification. Des indices de fronts à partir des gradients verticaux et du déficit d'énergie potentielle sont ainsi calculés.

Par exemple, l'indice de front à partir du gradient maximum en température est calculé de la manière suivante :

$$FT = \frac{1}{2} \max(GradLonT_{i,j-1} + GradLonT_{i,j}, GradLatT_{i,j-1} + GradLatT_{i,j})$$

avec

$$GradLonT_{i,j} = \frac{|StratT_{i+1,j} - StratT_{i,j}|}{dx_{i,j}} \quad \text{et} \quad GradLatT_{i,j} = \frac{|StratT_{i,j+1} - StratT_{i,j}|}{dy}$$

2.2.3. Indice d'upwellings

L'indice d'upwelling correspond à la somme des vitesses verticales sur toute la colonne d'eau

$$Upw = \sum_0^{nz} \tilde{w}$$

Soit \tilde{w} la vitesse verticale transformée en coordonnées σ .

L'équation de continuité permet de calculer, en fonction des composantes horizontales du champs de vitesse, \tilde{w} de chaque maille :

$$\tilde{w} = -\frac{\sigma}{h} \frac{\delta \xi}{\delta t} - \frac{1}{h} \int_0^\sigma \left(\frac{\delta(h_x u)}{\delta x} + \frac{\delta(h_y v)}{\delta y} \right) d\sigma$$

avec $h = H_0 + \xi$

2.2.4. Indices de panaches

Ces indices nous permettent de mettre en évidence l'extension horizontale des panaches fluviaux

Salinité de surface

Elle correspond à la salinité à la profondeur 3 m.

Hauteur d'eau douce équivalente

La hauteur d'eau douce équivalente est calculée à partir de la distribution verticale de la salinité en tout point du modèle (Choi, 2007).

$$heed = \int_{-H_0}^{\xi} \frac{S_0 - S_z}{S_0} dz$$

Cette technique permet directement d'estimer l'épaisseur du panache en plus de son extension horizontale.

2.2.5. Indices tourbillons

Les indices de tourbillons sont calculés pour une profondeur de 10m.

Vorticité

L'indice de vorticité mesure la rotation que subit le fluide. Il correspond au rotationnel de la vitesse.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

La vorticité est positive (négative) pour une rotation cyclonique (anticyclonique).

Okubo-Weiss

L'indice Okubo-Weiss permet de détecter les limites des tourbillons (Insern-Fontanet, 2006).

$$Okubo = \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$

où u et v sont les composantes verticales de la vitesse, x et y les coordonnées horizontales.

Les deux premiers termes représentent la déformation due au cisaillement et le dernier la vorticité relative. Les tourbillons sont caractérisés par une forte rotation en leur centre et une forte déformation en leur périphérie. Les tourbillons sont donc représentés par des valeurs d'Okubo-Weiss négatives entourées de valeurs positives.

2.2.6. Indices biologiques

Chlorophylle a de surface

Elle correspond à la concentration de chlorophylle a, à la profondeur 3 m.

La concentration en chlorophylle est calculée à partir de la concentration en azote des diatomées, dinoflagellés et du nanopicoplancton :

$$Chla = (N_{diato} + N_{dino} + N_{nano}) \times 1,59$$

avec le rapport Chla:N = 1,59 gChla/molN correspondant à un rapport stoechiométrique C:N=6.625 et un rapport mgChl-a/mgC=50.

Production primaire intégrée

Elle représente la production primaire intégrée sur toute la colonne d'eau et cumulée sur 3 jours. Elle est calculée à partir des production cumulée intégrée sur la verticale des diatomées, dinoflagellés et du pico-nanoplancton.

2.2.7. Autres indices

Température de surface

Elle correspond à la température à la profondeur 3 m.

Température de fond

Elle correspond à la température de la couche sigma la plus profonde.

Composantes horizontales du courant de surface

Les deux composantes horizontales du courant sont calculées à une profondeur de 10m.

3. Exemples de cartes et séries temporelles obtenues

3.1. Exemples de cartes d'indices

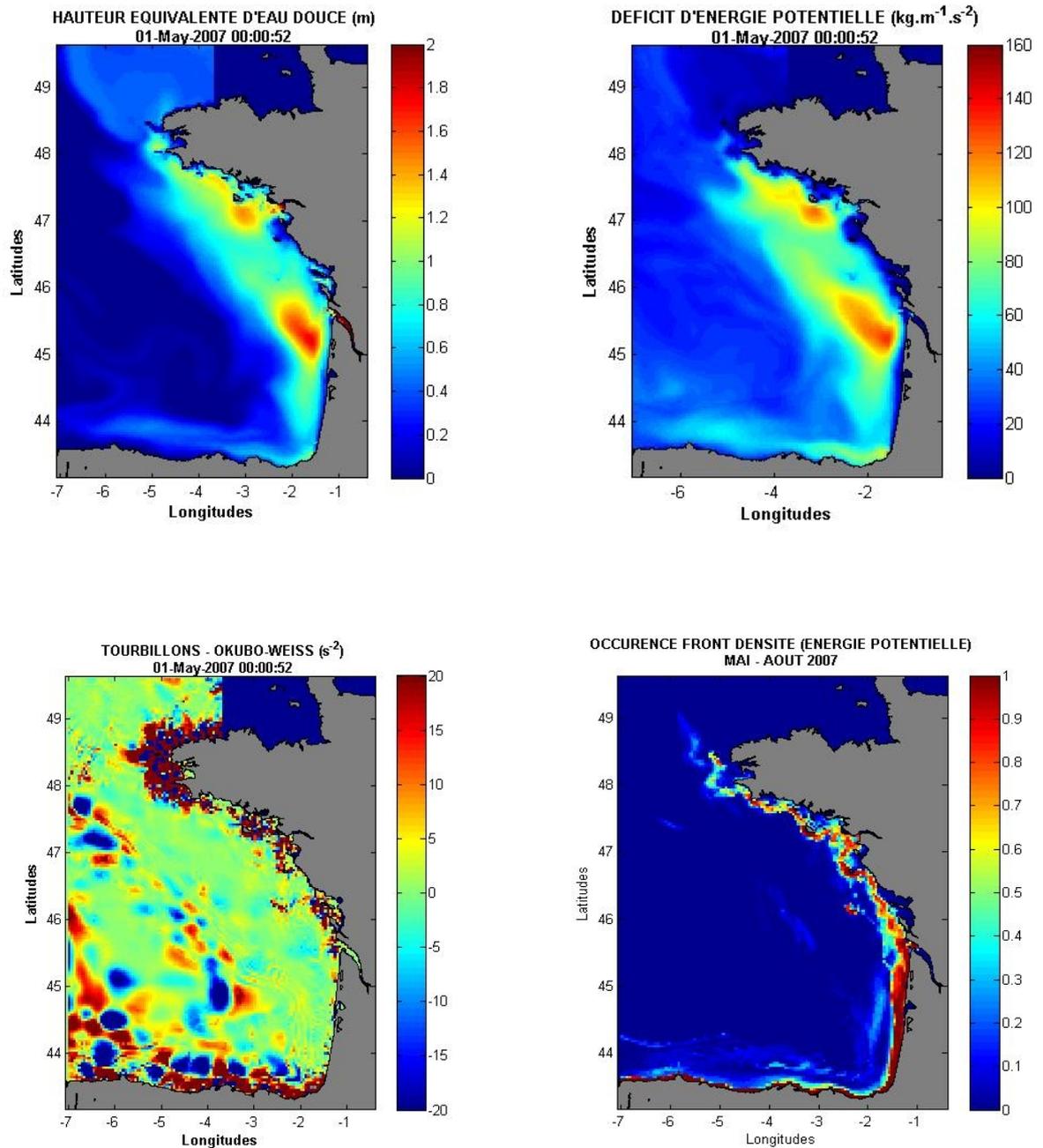


Fig.4. Exemples de cartes d'indices calculés à partir de la simulation hindcast 1971-2007.

3.2. Exemples de séries temporelles

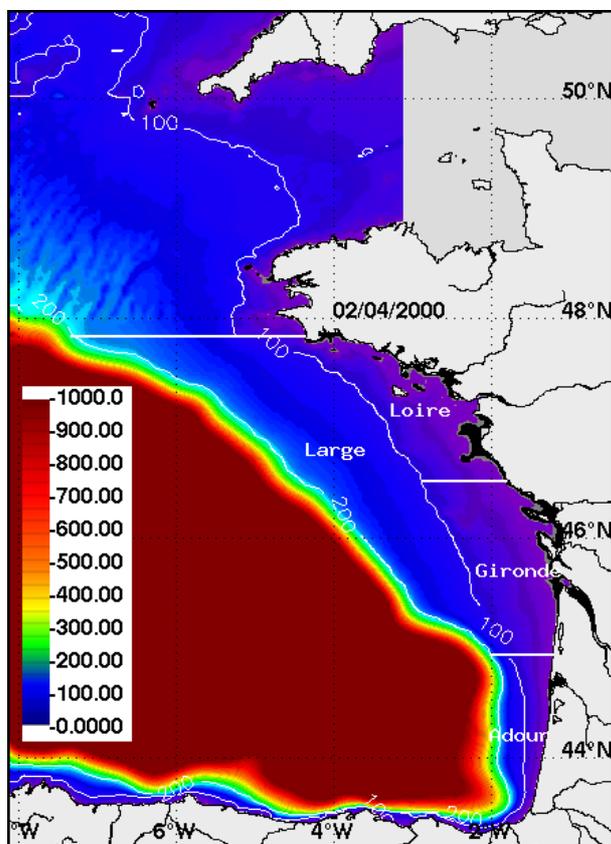


Fig. 5. Carte de la bathymétrie du golfe de Gascogne montrant les 4 zones sur lesquelles sont calculées les moyennes présentées sur les séries ci-dessous. La zone Adour couvre les Landes et est limitée au large par l'isobathe 200m, la zone Gironde est limitée par l'isobathe 100m, tout comme la zone Loire, et la zone du large part du nord des Landes jusqu'à la pointe bretonne, entre les isobathes 100 et 200m.

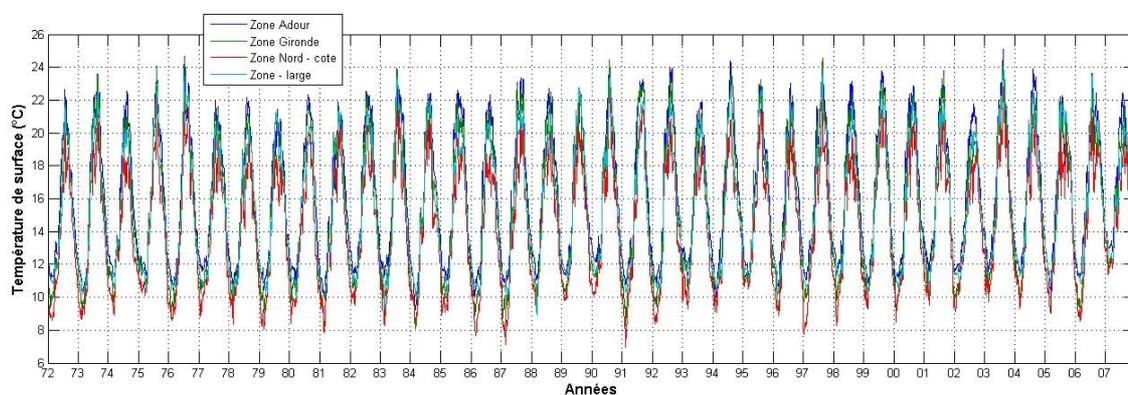


Fig. 6. Série temporelle de température de surface moyennée sur les 4 zones de la figure 4.

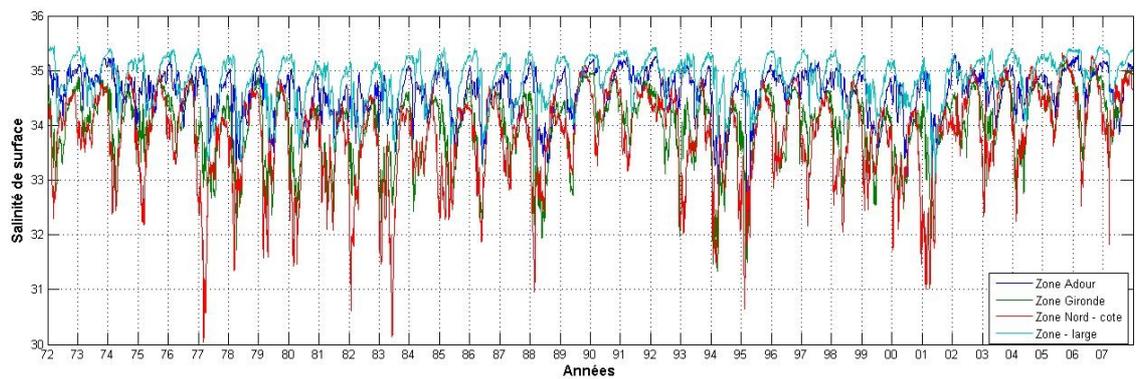


Fig. 7. Série temporelle de salinité de surface moyennée sur les 4 zones de la figure 4.

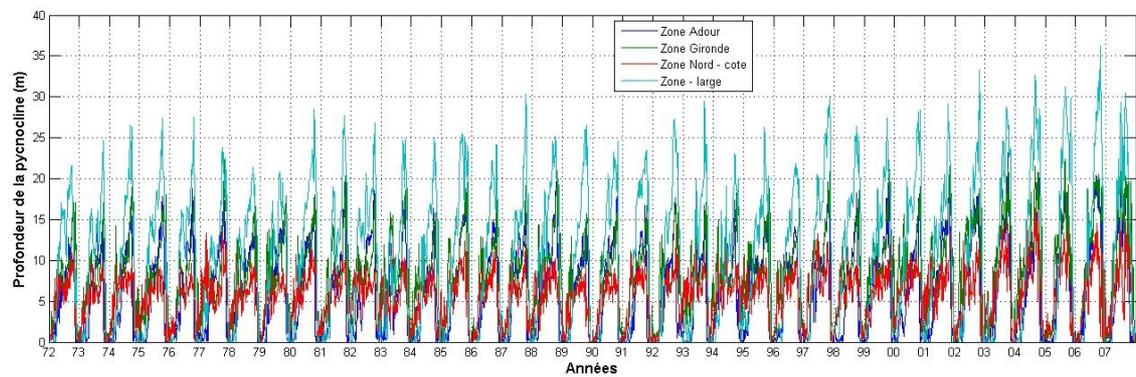


Fig. 8. Série temporelle de la profondeur de la pycnocline moyennée sur les 4 zones de la figure 4.

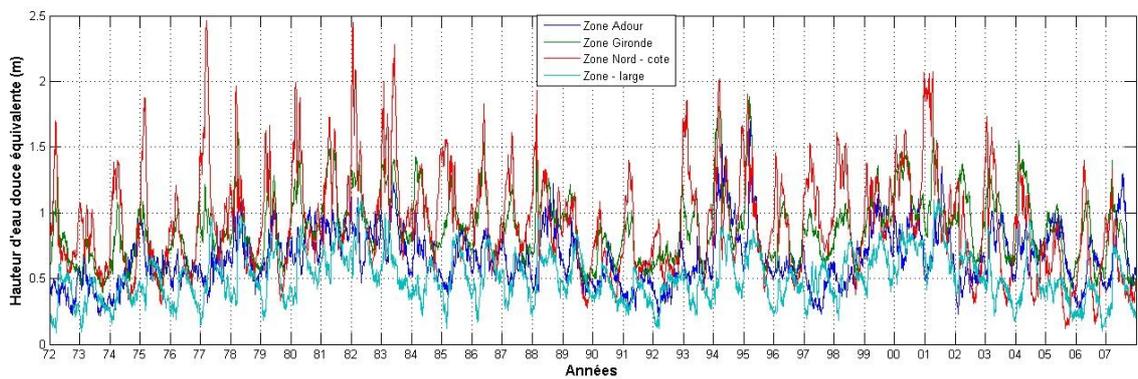


Fig. 9. Série temporelle de la hauteur d'eau douce équivalente moyennée sur les 4 zones de la figure 4.

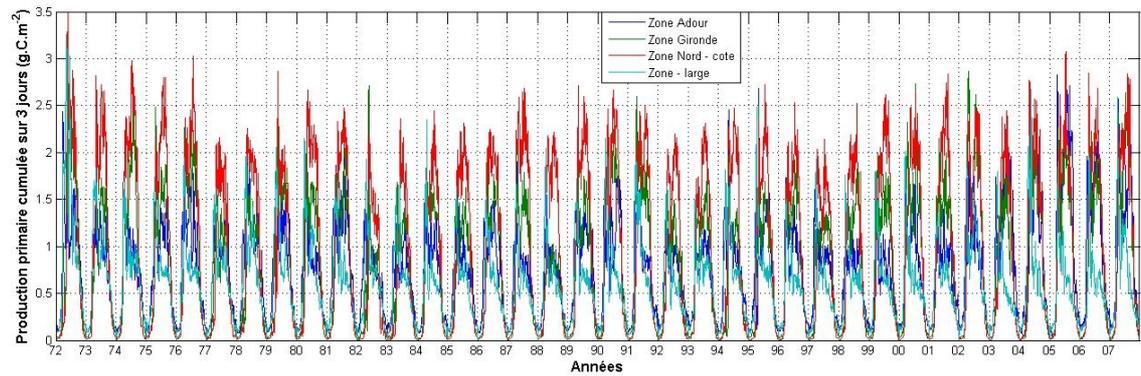


Fig. 10. Série temporelle de la production primaire intégrée moyennée sur les 4 zones de la figure 4.

4. Références

- Chapelle A., Lazure P., et Menesguen A. 1994. Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem – sensitivity analysis. *Estuarine coastal and shelf science*. 39(6): 529-548.
- Choi, B.J., Wilkin, J.L. (2007) The effect of wind on the dispersal of the Hudson river plume. *Journal Of Physical Oceanography*, Vol. 37, p. 1878-1897.
- Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J-M., Delmas D., Huret M., Herbland A., 2005. Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing Environment*. 95: 29-46.
- Guillaud J-F., 2008. Calcul en temps réel des concentrations fluviales en nutriments, en fonction des débits, sur la façade Atlantique, la Manche et le sud de la Mer du Nord. RST.DYNECO Pélagos 08-05.
- Huret M., 2005a. Apports des données «couleur de l'eau» à la modélisation couplée physique-biogéochimie en milieu dynamique côtier. Application au Rio de la Plata et au golfe de Gascogne. Thèse de Doctorat. Université Toulouse III. 264 pp.
- Huret M., 2005b. Modèle de production phytoplanctonique du Golfe de Gascogne. Rapport Interne. Ifremer DYNECO Pélagos.
- Huret M., Gohin F., Delmas D., Lunven M., Garcon V. 2007. Use of SeaWiFS data for light availability and parameter estimation of a phytoplankton production model of the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*. 65(1-4) : 509-531.
- Insern-Fontanet, J. , Garcia-Ladona, E., Font, J. (2006) Vortices of the Mediterranean Sea: An Altimetric Perspective. *Journal Of Physical Oceanography*, Vol. 36, p. 87-103.
- Lazure P., Dumas F. 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*. 31: 233-250.
- Lazure P., Garnier V., Dumas F., Herry C., Chifflet M., 2009. Development of a hydrodynamic model of the Bay of Biscay. Validation of hydrology. *Continental Shelf Research*, accepted.
- Le Pape O., Menesguen A. 1997. Hydrodynamic prevention of eutrophication in the Bay of Brest (France), a modelling approach. *Journal of Marine Systems*. 12: 171-186.
- Le Pape O., Jean F., Menesguen A., 1999. Pelagic and benthic trophic chain coupling in a semi-enclosed coastal system, the Bay of Brest (France): a modelling approach. *Marine Ecology Progress Series*. 189: 135-147.

- Levitus S., Boyer T. P., Conkright M. E., O' Brien T., Antonov J., Stephens C., Stathoplos L, Johnson D., Gelfeld R., 1998 : NOAA Atlas NESDIS 18, World Ocean Database 1998, U. S. Gov. Printing Office, Wash., D. C., 346pp + set of Cdroms.
- Loyer S., 2001. Modélisation de la production phytoplanctonique dans la zone côtière atlantique enrichie par les apports fluviaux. Thèse de Doctorat. Université de Paris VI. 232 pp.
- Menesguen A., Cugier P., Leblond I., 2006. A new numerical technique for tracking chemical species in a multisource, coastal ecosystem applied to nitrogen causing *Ulva* blooms in the Bay of Brest (France). *Limnology and Oceanography*, 51(1): 591-601.
- Pérenne, N. 2006. MARS a Model for Application at Regional Scale. Documentation scientifique V0.1. HOCER.
- Reynaud T., P. Le Grand H. Mercier and Barnier B., 1998. A new analysis of hydrographic data in the Atlantic and its application to an inverse modeling study. *International WOCE Newsletter*, 32, 29-31.