

**Actions vers une Modélisation Intégrée Côtière Opérationnelle (AMICO) – Phase I**  
Programme Copernicus du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (Copernicus-MTES)

*Nombreux contributeurs :*

*F. Arduin, N. Ayoub, S. Brumer, P. De Mey, M. Ghantous, V. Garnier, F. Kessouri, A. Khojasteh, P. Marsaleix, C. Peruche, J. Pianneze, C. Pinazo, JL Redelsperger, G. Reffray, O. Ross, M. Sourisseau, B. Thouvenin, F. Toubanc, C. Ulses , ...*

*Laboratoires: LEGOS, LA, LPHS, LOPS, Mercator-Océan, MIO, ...*



# Quelques éléments de contexte

La compréhension et les capacités d'analyse et prévision de l'océan côtier nécessitent de prendre en compte la complexité spécifique à ce milieu:

- Influence forte du continent: contrainte géométrique des bassins, apports continentaux, etc
- Superposition et couplage de processus: marées, courants de bord, circulation forcée par le vent, ondes internes, vagues, mélange, etc.
- Dynamique haute fréquence importante, en partie d'origine atmosphérique locale et distante, conjointement à une variabilité saisonnière et basse fréquence océanique
- Processus de fine échelle: fronts de température, marée et de panache, marée interne, ondes solitaires, thermoclines extrêmement pincées
- Forte hétérogénéité du substrat: sédiments et habitats benthiques.

# Quelques éléments de contexte

**L'Océanographie Cotière Opérationnelle (OCO)** nationale et ses liens avec la Recherche sont en construction

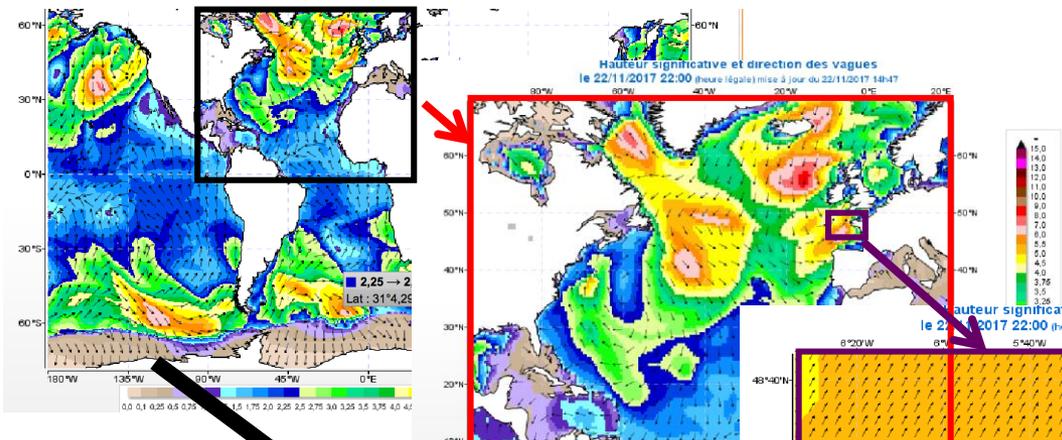
- Acteurs: Météo-France, SHOM, Ifremer, CETMEF, Mercator-Océan, MTES, ...
- Dernier exercice de prospective nationale sur l'Océanographie Opérationnelle (2013) mentionne pour l'OCO:
  - Communauté Recherche a conscience de l'intérêt scientifique des applications, de la prise en compte des besoins sociétaux et écologiques
  - Nécessité de progresser sur les différents couplages

# AMICO (2013-2018)

MEDDE /MTES a décidé de soutenir une recherche amont pour l'OCO pour

- Poser les premières « briques » scientifiques de futurs systèmes opérationnels couplés
- Associer acteurs scientifiques et opérationnels au travers de chantiers intégrés pilotes
- Objectifs
  - Faire avancer les questions scientifiques bloquantes
  - Contribuer à l'effort français Copernicus et CMEMS
  - Développer des outils qui faciliteront des actions transverses à ces questions ainsi qu'à une structuration de la communauté nationale (Chercheurs + Opérationnels)
- Focus sur la modélisation numérique des différents couplages (Recommandation de la prospective OO)
  - Couplage d'échelles de la circulation océanique régional-côtier (PI: P. De Mey)
  - Couplage d'échelles physique-BioGéoChimie hauturier-régional-côtier (PI: C. Pinazzo)
  - Couplage entre basse atmosphère, vagues et océan (PI: JL Redelsperger)

# Descentes d'échelles pour simulations océan, atmosphère, vagues biogéochimie



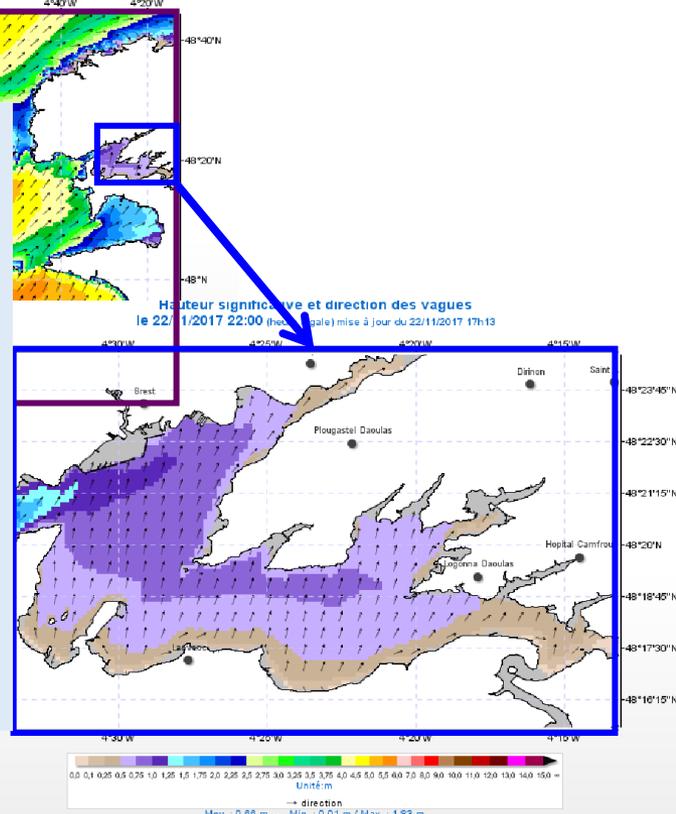
## Illustration pour les vagues

**Global => Domaine limité**

**Résolution horizontale de plus en plus fine**

**Au moins deux difficultés:**

- Initialisation et forçage aux bords du domaine limité (données d'un domaine à résolution moins grande)
- Processus physiques à représenter peuvent être différents d'une échelle à une autre



# Descentes d'échelles: Zoom côtier

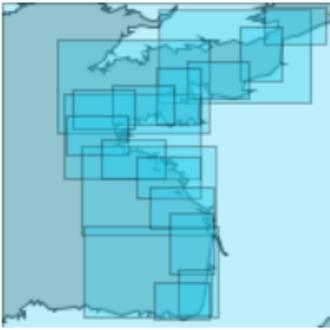
## Illustration pour les vagues



Modélisation des hauteurs, fréquences et directions des vagues.

Sélectionner une zone parmi les modèles disponibles.

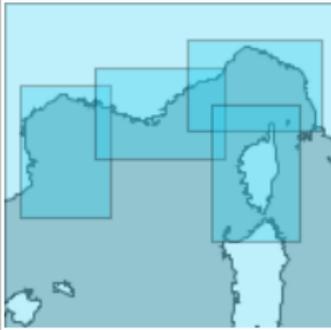
### Modèles Atlantique Nord



[Consulter les résultats...](#)

Manche-Golfe de Gascogne ▾

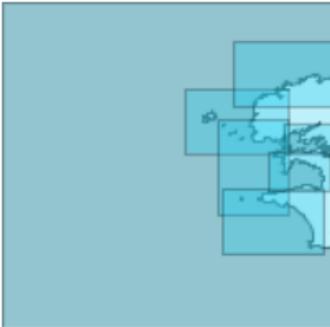
### Modèles Méditerranée



[Consulter les résultats...](#)

Mer Méditerranée Nord-Ouest ▾

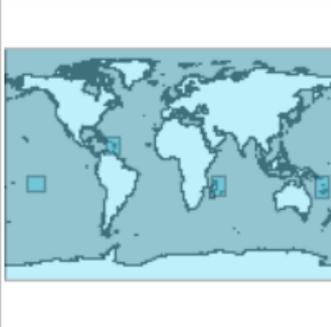
### Modèle Iroise



[Consulter les résultats...](#)

De l'île Vierge à la Pointe de ▾

### Modèles ultramarins



[Consulter les résultats...](#)

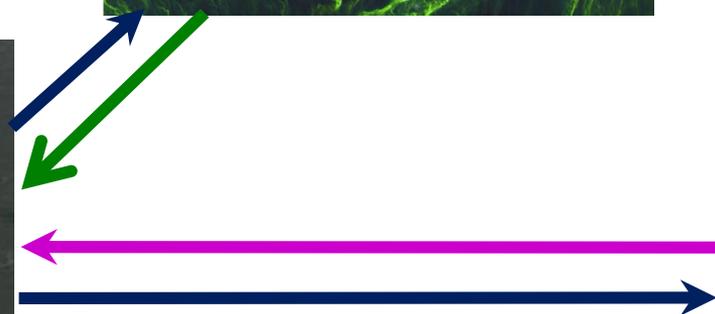
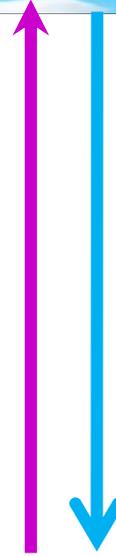
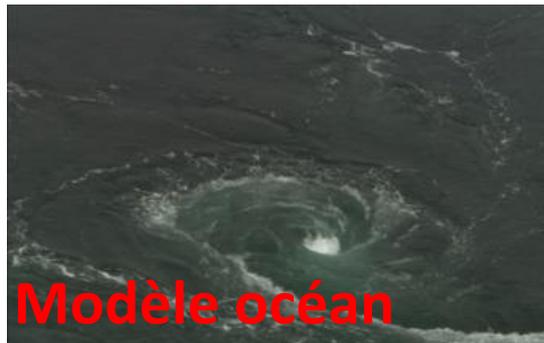
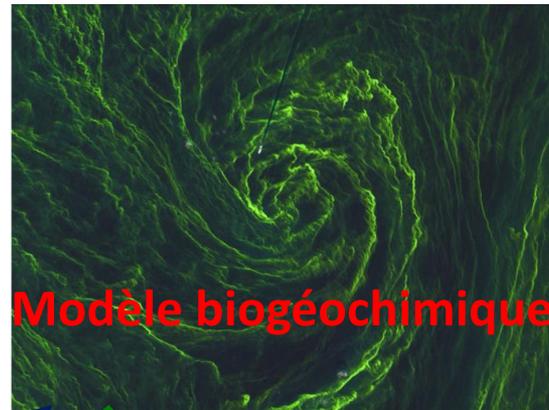
Monde ▾

pour accéder aux données, merci de remplir [ce formulaire](#)

# Couplage entre modèles



Quelles variables à échanger ?  
A quelle fréquence ?  
Compatibilité des  
représentations intrinsèques  
aux modèles ?  
Echelles des interactions ?  
Etc ...



## Problématique et Objectifs

Descente d'échelles: Continuum d'échelles entre hauturier et côtier (p.e ondes côtières, marée)

- Quelles informations du modèle parent utiliser dans un zoom côtier/plateau?
- Comment quantifier et prendre en compte la qualité du modèle parent (incertitudes) ?
- Comment gérer la création de modes transitoires (p.e. surface libre) du fait que la solution du modèle parent n'est pas solution du modèle enfant  
=> Problème spécifique de la descente d'échelles pour la marée

-----  
=> Se focaliser sur les informations physiques (courants, température, etc.)

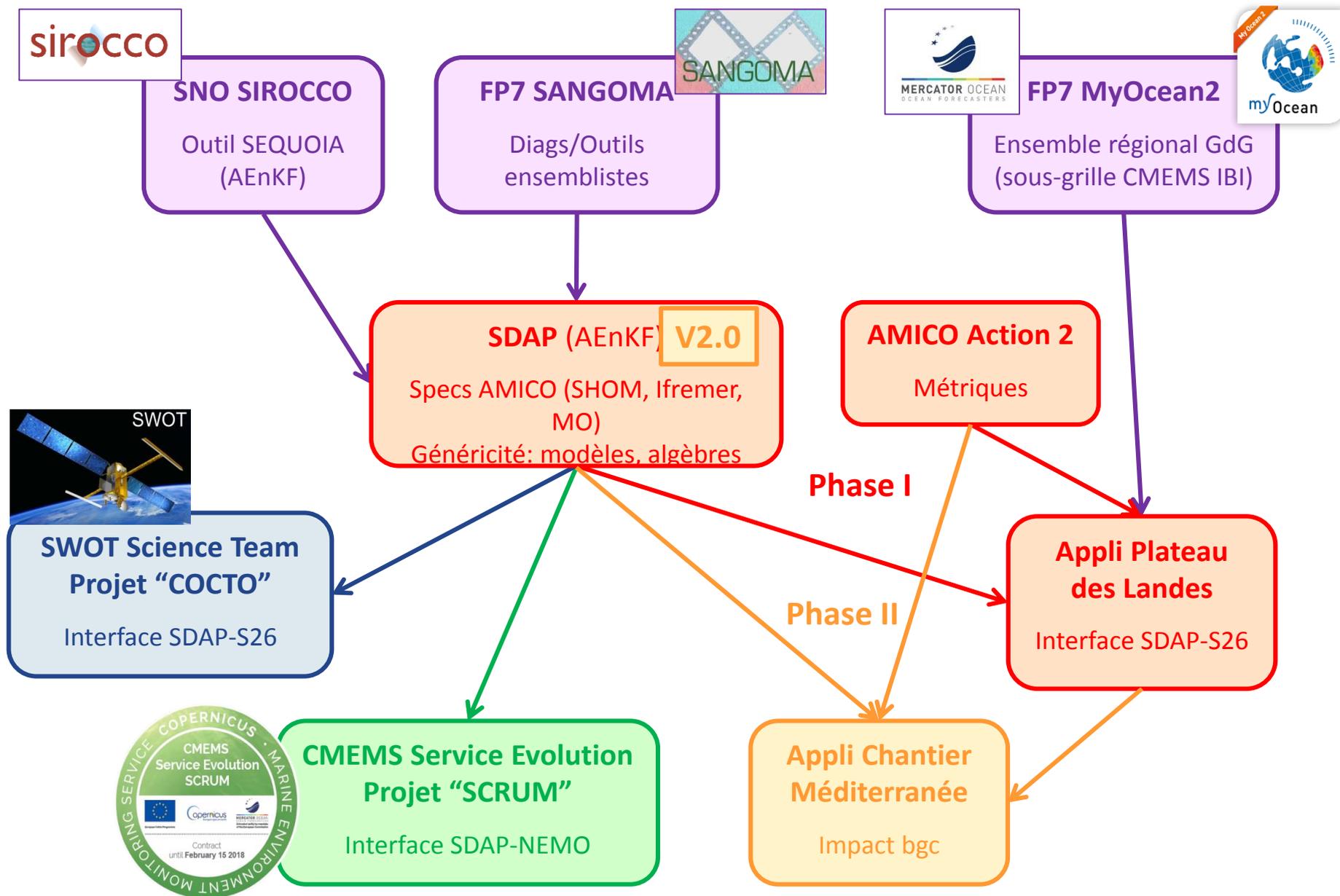
⇒ Développer un **outil ensembliste d'assimilation de données intégrant les estimations de l'état et les incertitudes associées** issues (1) du système régional, (2) du système côtier et (3) d'observations locales

⇒ Développer un outil générique: portable sur différents modèles côtiers, zones, etc.

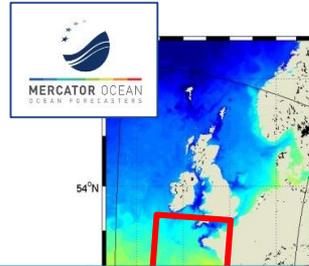
=> Evaluer sur le Golfe de Gascogne (Phase I) et la Méditerranée (Phase II en cours)

# Couplage dynamique d'échelles de la circulation océanique régional-côtier

## Liens avec programmes de R&D



# Domaines de modélisation (Plateau des Landes)



## Configuration « BOBLAND »

- Modèle SYMPHONIE version S.26
- Résolution 500 m

### Quantification des incertitudes

- Domaine parent BISCAY36
  - Runs d'ensembles MyOcean (Quattrocchi et al. 2014; Vervatis et al. 2016 / NEMO)
  - Runs d'ensembles SCRUM (CMEMS SE) (Vervatis et De Mey 2017 / NEMO + PISCES)
- Domaine enfant BOBLAND
  - Descente d'échelles des incertitudes du modèle parent (via les conditions aux limites)
  - Sources d'erreur locales: perturbations stochastiques du vent
- Incertitudes liées à différents types de (pseudo-) observations locales

**=> Ces incertitudes sont utilisées dans un schéma d'assimilation (EnKF) pour fournir la meilleure estimation à haute résolution**

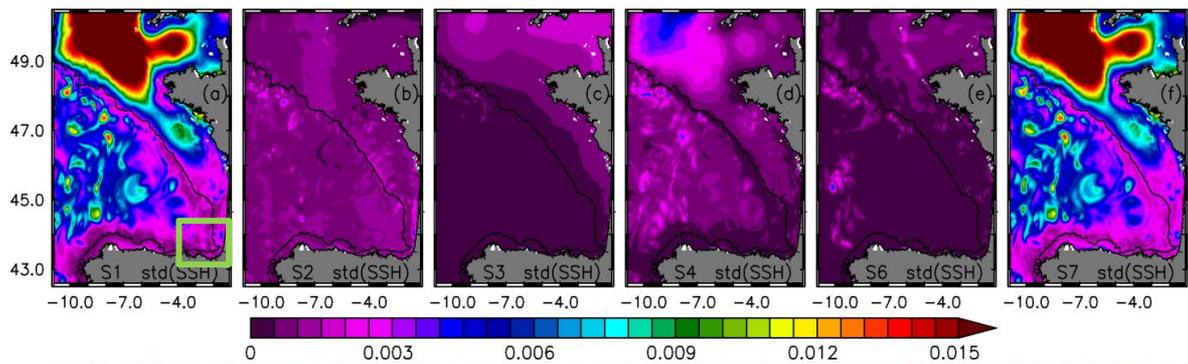
## Incertitudes (Ecart-type d'ensemble)



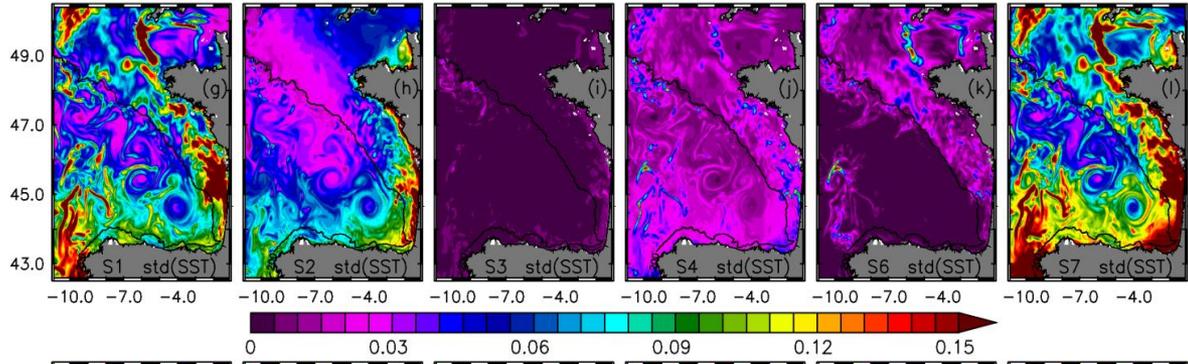
Variables

Vent       $T_{air}$       SLP       $C_d C_e C_h$        $C_b$       Total

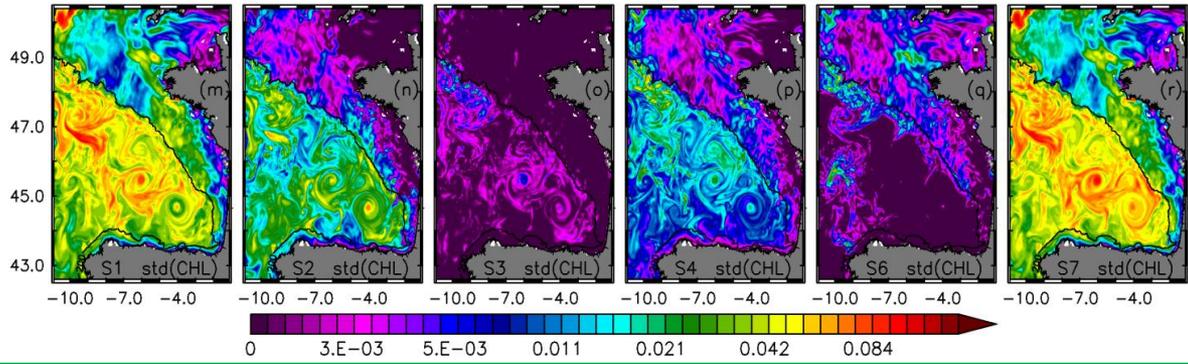
SSH  
(m)



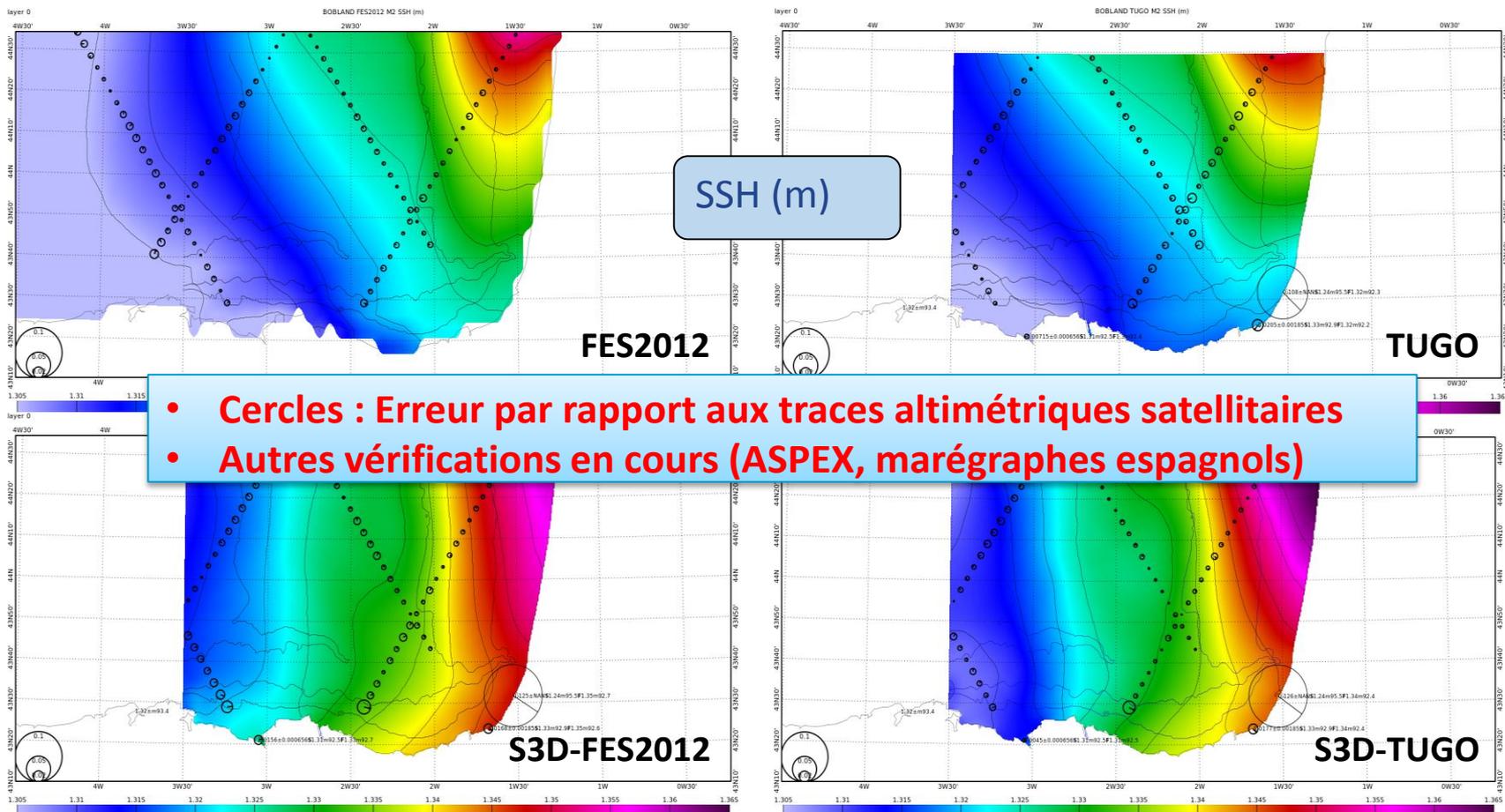
SST (°C)



CHL  
(mg/m<sup>3</sup>)



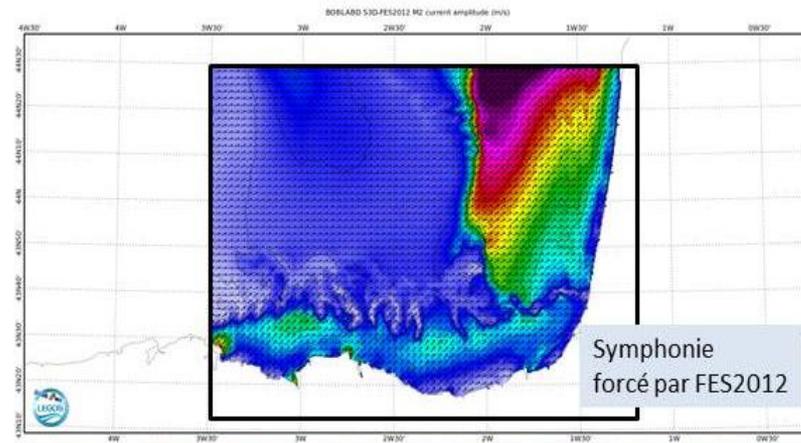
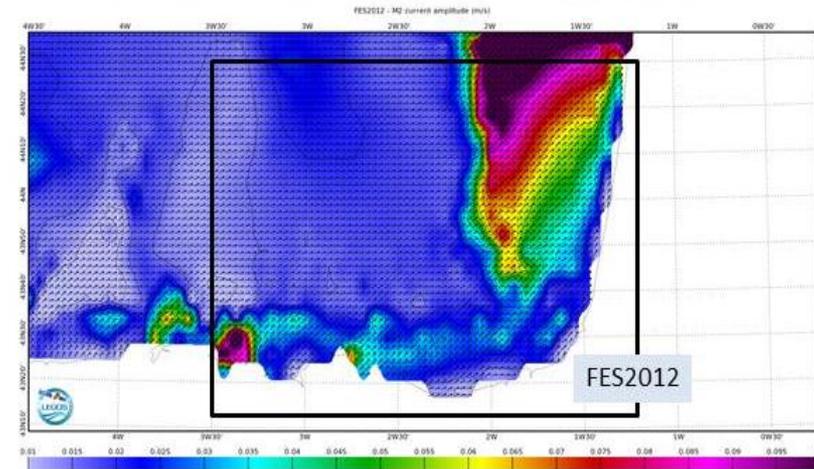
# Descente d'échelles pour la marée régionale



<b>FES2012</b>	Run TUGO (2DEF spectral avec assimilation) sur grille globale
<b>TUGO</b>	Run TUGO (2DEF) sur grille BOBLAND, forcé aux frontières par FES2012
<b>S3D-FES2012</b>	Run Symphonie 3DFD forcé par FES2012
<b>S3D-TUGO</b>	Run Symphonie 3DFD forcé par TUGO

# Descente d'échelles pour la marée régionale

## Amplitude du courant de marée (m/s) – M2



## Valeur ajoutée en terme de courants

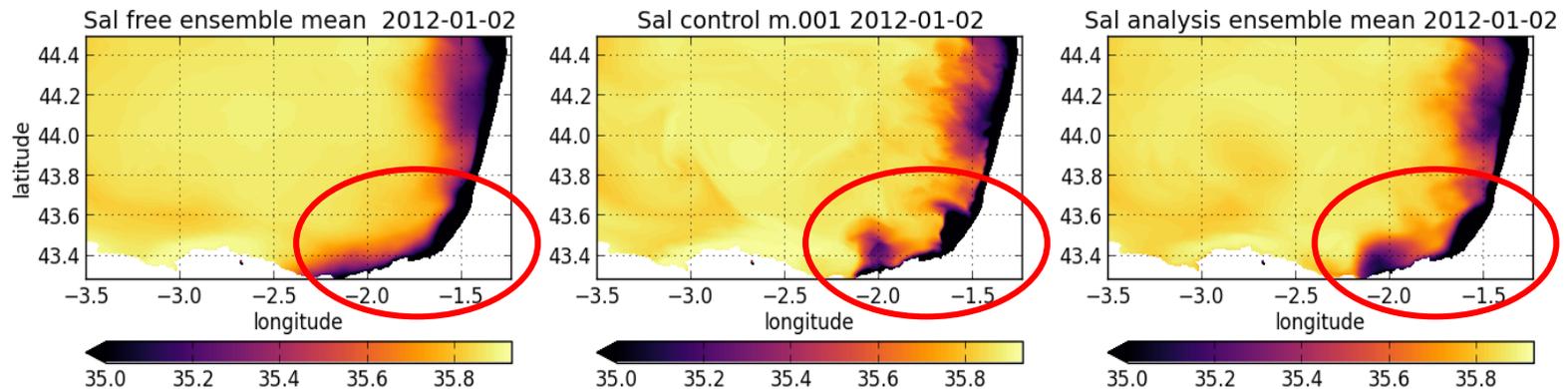
- Meilleure prise en compte de la bathymétrie (canyons)
- Couplages entre marée et autres processus pris explicitement en compte (p.ex. M4)

# Apport de l'assimilation de niveau de la mer (SSH) et SST dans le zoom par Filtrage de Kalman d'Ensemble (EnKF)

Simple downscaling  
depuis IBI/BISCAY36

“Vérité” (au sens  
OSSE)

Solution assimilée



Exemple de la salinité de surface le 2 janvier 2012

- Valeur ajoutée de l'assimilation:
  - Amélioration de la salinité alors qu'elle n'est pas observée
  - Petites échelles du plateau interne dues au panache de l'Adour
  - Plus grandes échelles au large (peu visible sur ce cas)

# Couplage d'échelles de la circulation océanique régional-côtier

## Résultats principaux

- Mise au point d'un **outil d'estimation générique adapté à la descente d'échelles en côtier pour la physique de l'océan**:
  - Apport net de **valeur ajoutée** par rapport aux simulations CMEMS
  - Utilisation en cours dans **CMEMS Service Evolution**
  - **Nouvelle version** en préparation pour des domaines imbriqués plus grands ou à des échelles plus fines.
- Application à **l'assimilation dans un modèle à grille très fine (500m)** sur 2 zones d'études: Golfe de Gascogne (imbrication CMEMS/IBI) et Méditerranée occidentale (double imbrication CMEMS/MED)
  - Prise en compte des **incertitudes du modèle parent** et des **incertitudes locales** via des ensembles de simulations
  - Mise au point d'un **protocole d'expériences jumelles d'ensemble** en situation de descente d'échelles (type « OSSEs d'ensemble »)
- Pour la **descente d'échelles de la marée** apport positif d'une simulation de marée dédiée

# Couplage d'échelles physique-BioGéoChimie (BGC) hauturier-régional-côtier : Problématique & Objectifs

**Descente d'échelles système BGC hauturier => régional/côtier/plateau**

**Nécessité d'améliorer les forçages aux limites dans les modèles couplés physique-BGC régionaux pour reproduire les processus d'échanges côte – large**

- Déterminer la meilleure approche pour les forçages BGC imposés aux limites de source externe (modèle plus grande échelle, climatologie, mesures in situ/spatiales)
- Cibler l'impact des courants résolus ou extérieurs sur la BGC
- Définir des métriques pour déterminer la qualité de la modélisation de ces processus
- Déterminer la faisabilité de la connexion entre OO Globale et Régionale pour les processus BGC

# Couplage d'échelles physique-BioGéoChimie hauturier régional-côtier

## 4 systèmes de modèle différent

### Sensibilité à différentes conditions limites

- **Configurations Atlantique**

- Hauturière Copernicus + BIOMER: Mercator-Vert ( $1/4^\circ$ ) (Gehlen et al., 2007)

- Régionales:

- R1: IBI12-PISCES ( $1/12^\circ$ ) (Dol, 2011)

- R2: MANGA-ECOMARS3D (4 km) (Huret et al., 2013 ; Ménesguen et al 2007, 2011)

- **Configurations Méditerranée**

- Hauturière Copernicus MED16-BFM ( $1/16^\circ$ ) (Lazzari et al., 2012)

- Régionales:

- R3: Symphonie-ECO3M (1 km) (Auger et al., 2011)

- R4: GULI-ECO3M (2007-2012) (1.2 km). (Pinazo et al., 2012; Fraysse et al., 2013 ; 2014)

- Durée simulations 1.5 ans (2011-mi-2012) à 3 ans (2010-2012)

- Sensibilité aux forçages BGC aux limites

- Neumann avec gradient nul

- Dirichlet avec valeurs imposées issues de résolution horizontale plus lâche

- Même modèle moyennées temporellement (6h au mois)

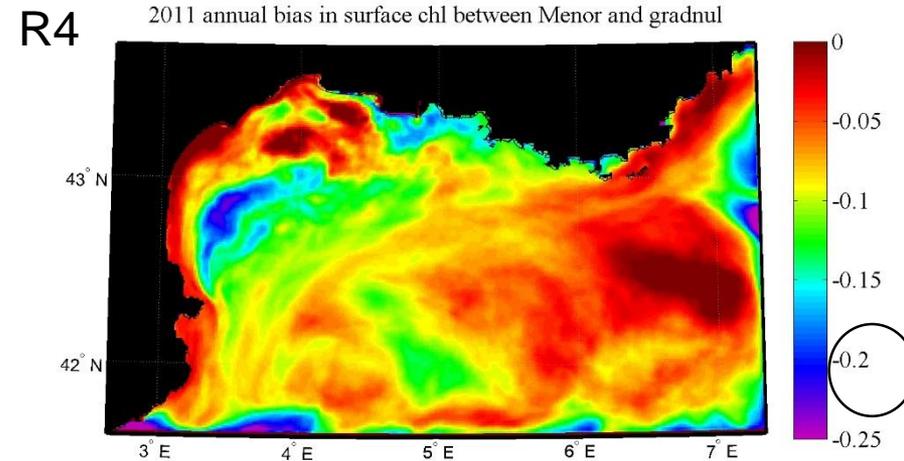
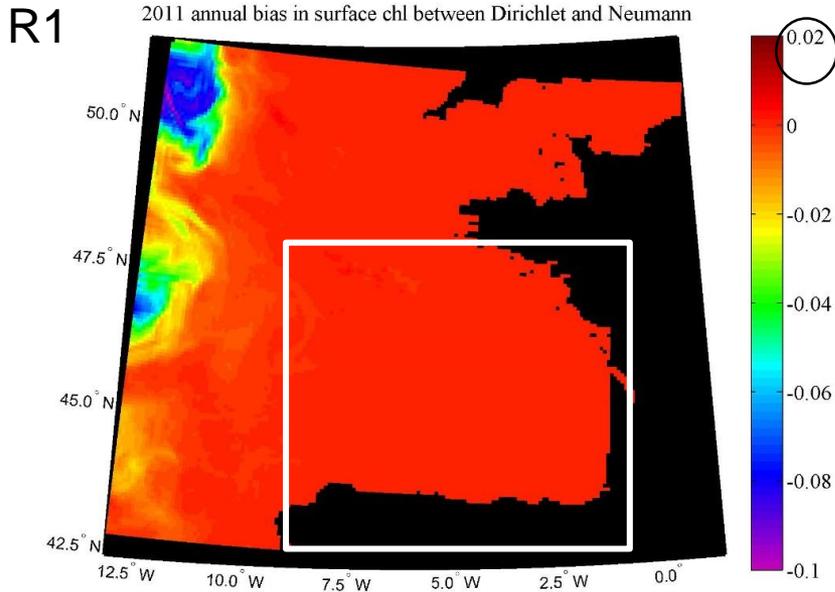
- Autre modèle (BIOMER, BFM)

- Climatologie LEVITUS

# Exemple de différence annuelle de la Chlorophylle de surface entre Conditions Limites Dirichlet et Neumann

**Influence faible des CL loin des bords**

**Influence forte des CL dans zones de courants régionaux**

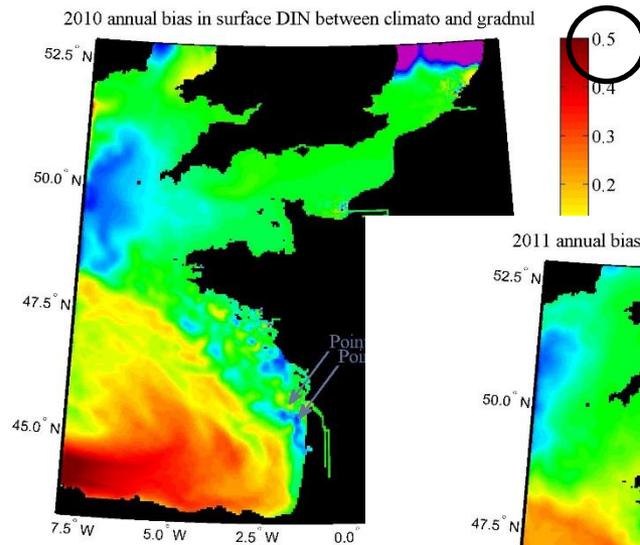


# Simulation de 3 ans R2 / Moyenne annuelle

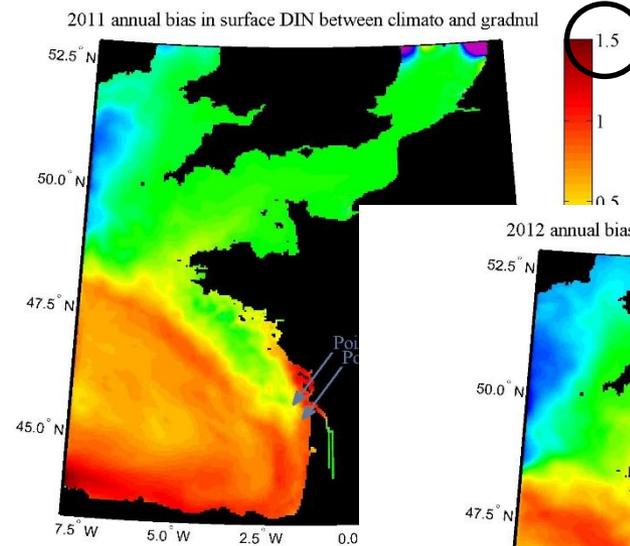
## Dissolved Inorganic Nitrogen (nutriments azotés nitrate + ammonium)

La distance des CLOs doit être augmentée avec le temps des simulations

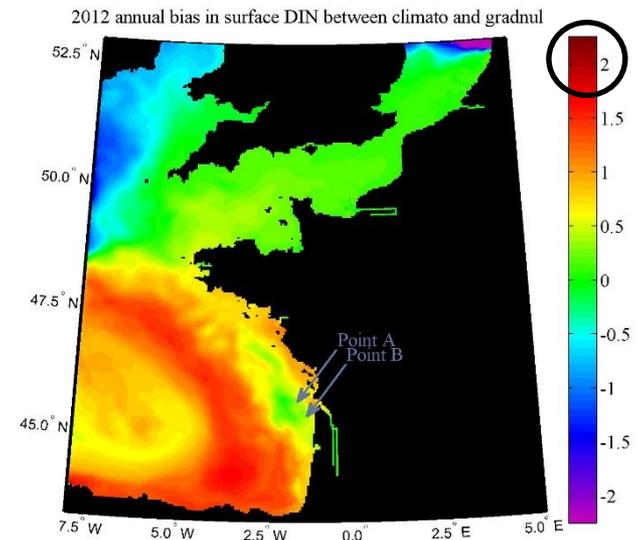
2010



2011



2012

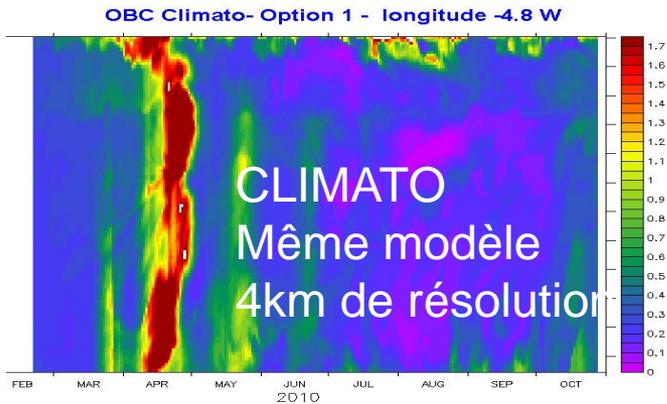
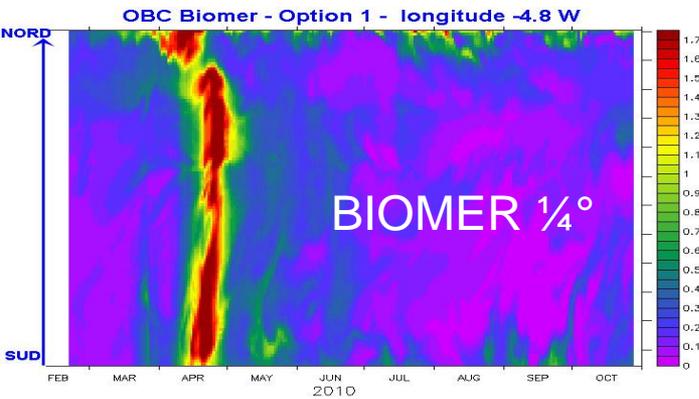


# R2 : Cycle annuel de la Chlorophylle en surface

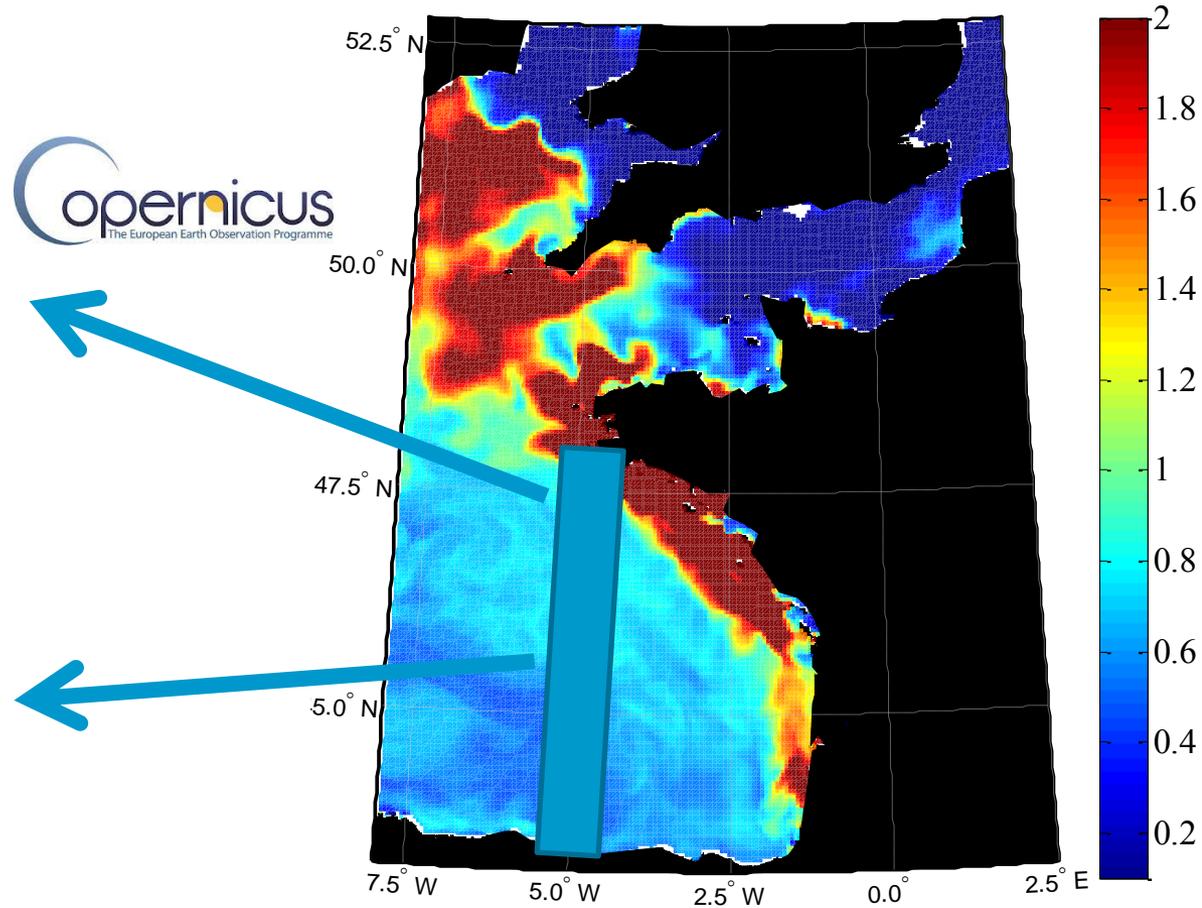
## Forçages d'origine différente appliqués aux limites

Forçages affectent la quantité de nutriments injectés mais pas la dynamique temporelle intrinsèque régionale

### Chlorophylle a surface - 2010-



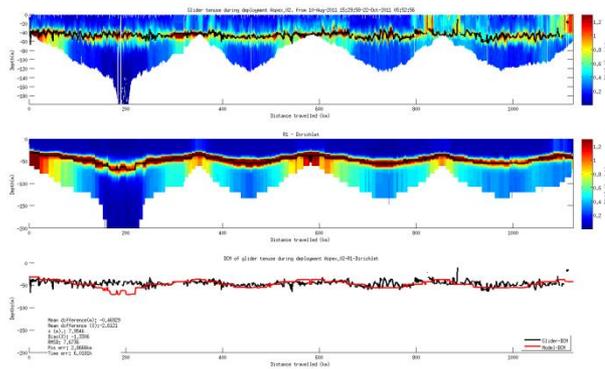
Copernicus  
The European Earth Observation Programme



# Métriques développées pour la BGC

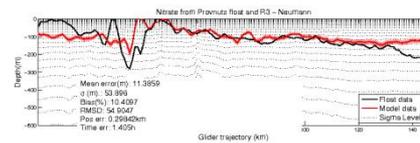
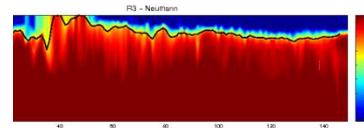
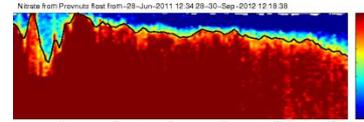
- Métriques Modèle-Modèle : comparaison pour 1 même modèle Régional de l'impact des différents choix de modélisation (biais, RMSE, corrélation...)
- Métriques Modèle-Mesures: évaluation à partir de Métriques prédéfinies (mouillages, gliders, flotteurs, ferrybox, radar HF ...)

Glider-R1



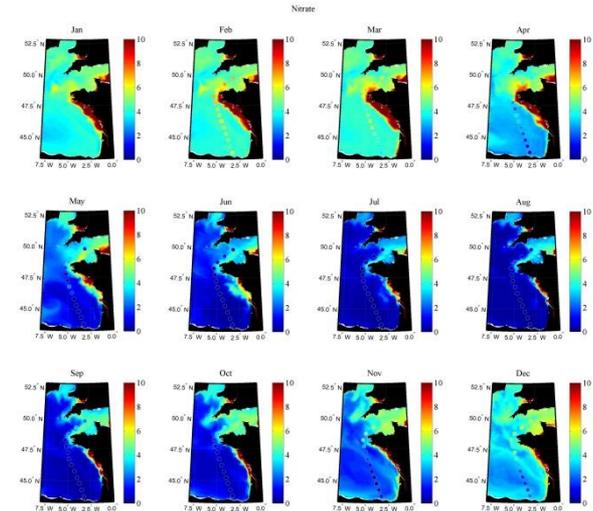
DCM

Flotteur-R3



Nitracline

Ferrybox-R2



Nitrate surface

# Couplage d'échelles physique-BioGéoChimie hauturier-régional-côtier : Principaux Résultats

Les modèles régionaux BGC peuvent être forcés par les modèles hauturiers

- les modèles régionaux conservent leur dynamique propre, sous réserve
  - De simulations courtes (prévisions vs ré-analyses)
  - D'avoir la bonne quantité de nutriments et des nutriclines correctes aux frontières
  - De conserver un équilibre entre modèles bio, surtout dans le cas d'assimilation bio
- Conditions limite de type Dirichlet recommandées
  - Forçages issus du même modèle bio à plus grande emprise donne les meilleurs résultats (sous réserve qu'il fonctionne bien à grande échelle)
  - Forçages de l'OO hauturière (CMEMS) pour les nutriments peuvent être différentes, mais la dynamique temporelle intrinsèque du modèle régional n'est pas modifiée

Forçages biogéochimiques imposés aux CLOs des modèles régionaux

- **Sensibilité à la distance des frontières par rapport au domaine étudié :**
  - Plus la frontière est loin du domaine d'intérêt plus l'influence est faible (quelque soit le type d'OBC)
  - La distance doit être augmentée avec le temps de simulation
  - La distance minimale dépend de l'hydrodynamique de la région

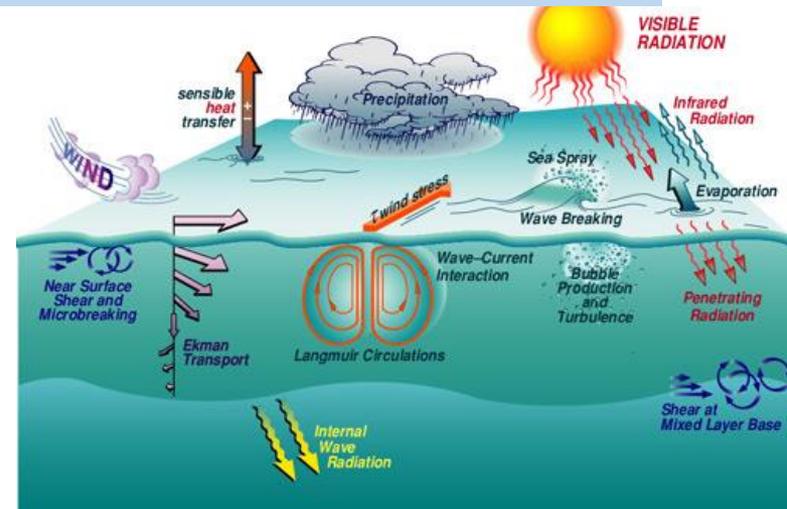
# Couplage entre atmosphère, vagues et océan aux échelles côtières

## Problématique et Objectifs

### Rétroactions entre les différentes dynamiques

- atmosphérique
- océanique
- vagues

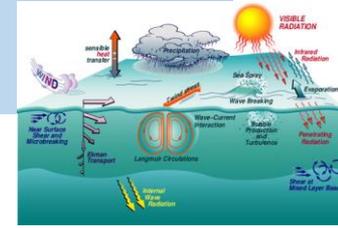
Echanges océan-atmosphère fonction du vent, courants, état de mer, stabilité atmosphérique, température de la mer ...



- La réaction rapide de l'atmosphère aux changements de l'océan est importante à prendre en compte aux petites échelles (côtière)
- Vagues et vent s'ajustent en permanence
- Forçage atmosphérique côtier est spécifique : brises, vents locaux, différentiel de frottement entre terre et mer, ...
- Turbulence générée dans l'océan liée au déferlement des vagues
- Etc

# Couplage entre atmosphère, vagues et océan aux échelles côtières

## Objectifs



- Développer un outil générique de couplage atmosphère-vagues-océan à l'échelle côtière pour pouvoir être utilisé par d'autres modèles dont ceux utilisés en prévision
- Adapter la physique du modèle de vagues pour mieux représenter les tensions de vent (vent fort, petit fond, ...)
- Appliquer le système couplé aux résolutions horizontales du km sur des sites côtiers où les interactions océan atmosphère vagues sont différentes
- Développer un prototype de système couplé permettant de descendre aux échelles horizontales hectométriques
- Améliorer notre compréhension des interactions Océan-Atmosphère-Vagues en zone côtière
- Préciser les impacts de ces interactions sur la prévision de la dynamique et la biologie de l'océan

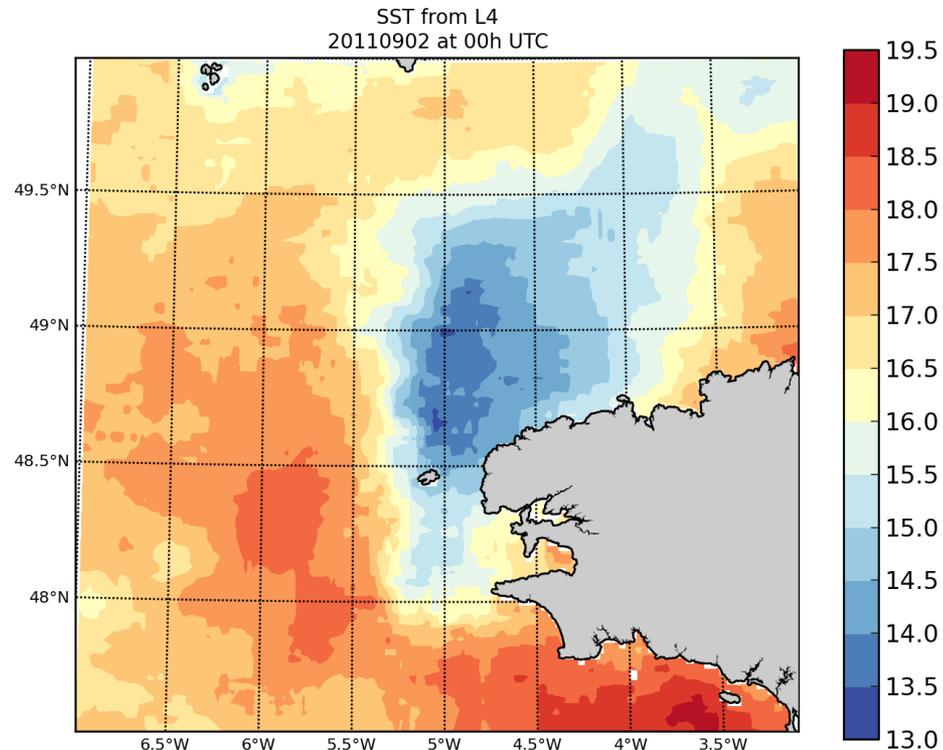
# Forçages atmosphériques

Pour forcer les modèles d'océan régionaux/côtier, on utilise en général des prévisions (ou analyse) météorologiques issues du modèle européen ECMWF ou français AROME (1.2 km)

Est ce suffisant en région côtière (courants de marée, fronts de température de mer, etc) ?

Température de la mer  
observée par satellite  
en Mer d'Iroise

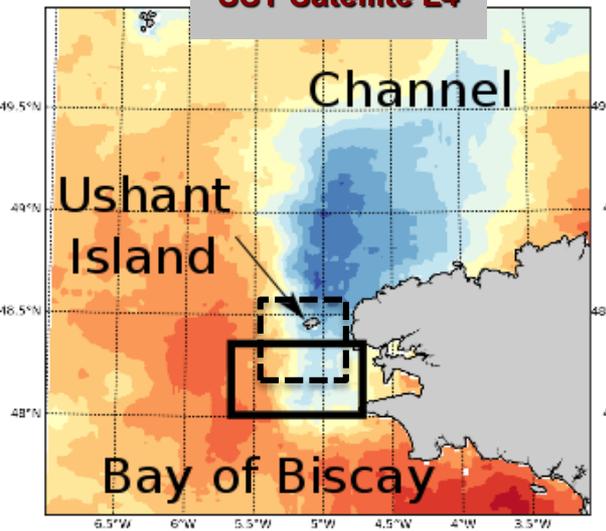
Front saisonnier marqué



# Forçages atmosphériques

Quel forçage de température de mer utilisé en prévision météorologique ?

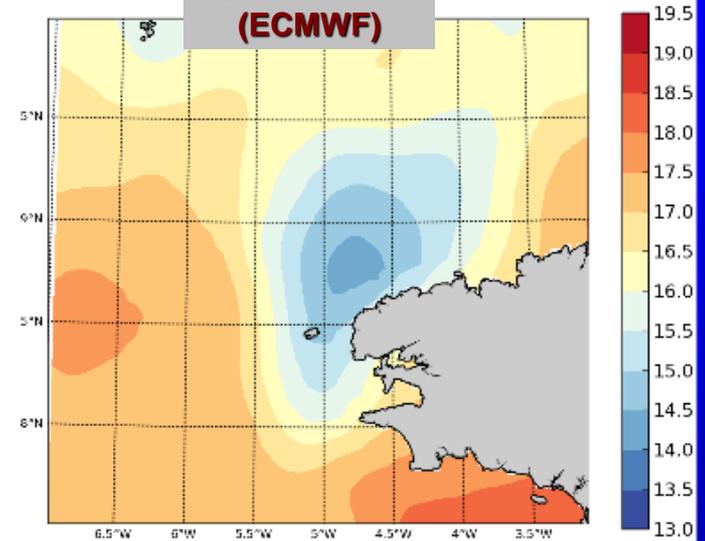
**SST Satellite L4**



(a)

**Résolution 2.5km**

**SST AROME  
(ECMWF)**



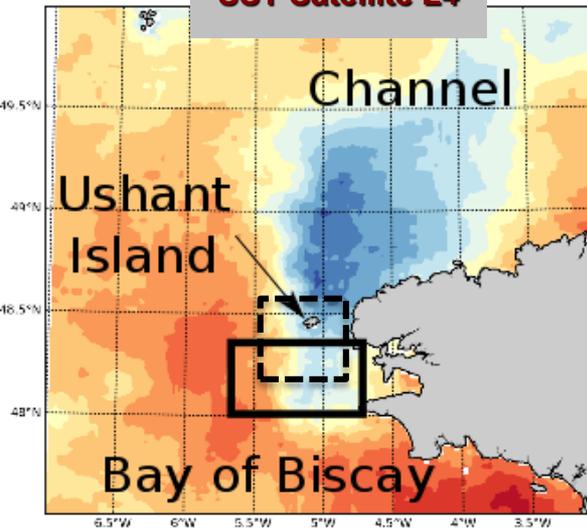
(c)

**Produit OSTIA  
Résolution donnée à 10km,  
mais plutôt à 50-100km**

# Forçages atmosphériques

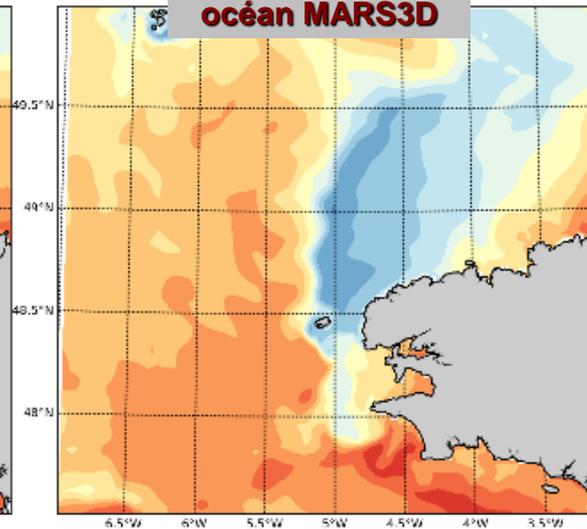
Quel forçage de température de mer utilisé en prévision météorologique ?

**SST Satellite L4**



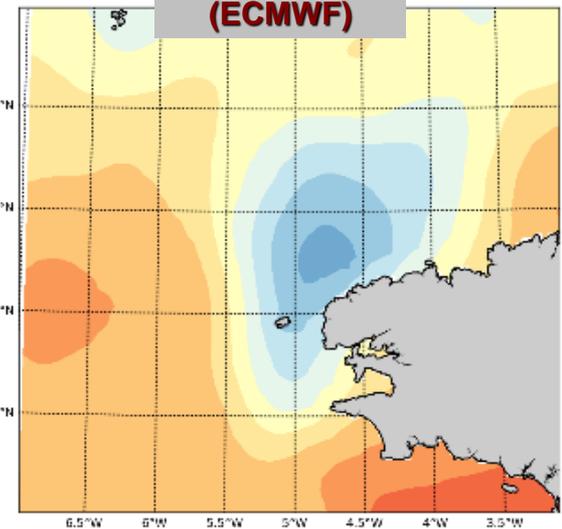
(a)

**SST modèle océan MARS3D**



(b)

**SST AROME (ECMWF)**

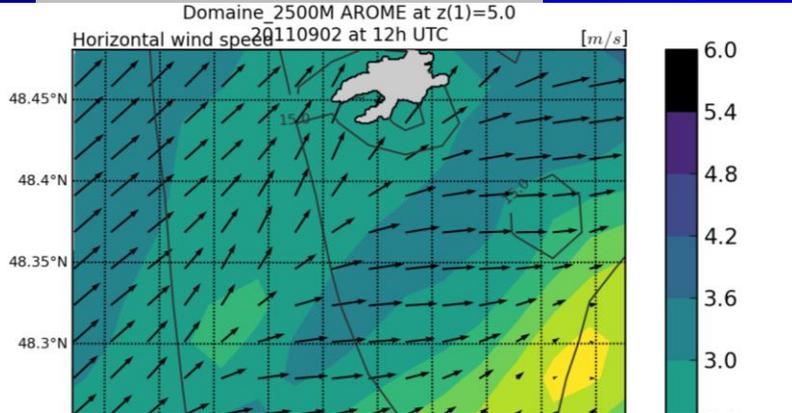


(c)

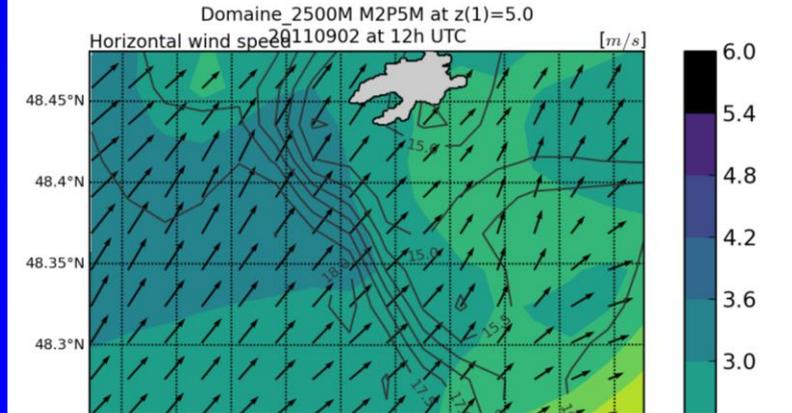
**Résolution 2.5km**

**Produit OSTIA  
Résolution donnée à 10km,  
mais plutôt à 50-100km**

**Forçage par SST AROME**



**Forçage par SST MARS3D**



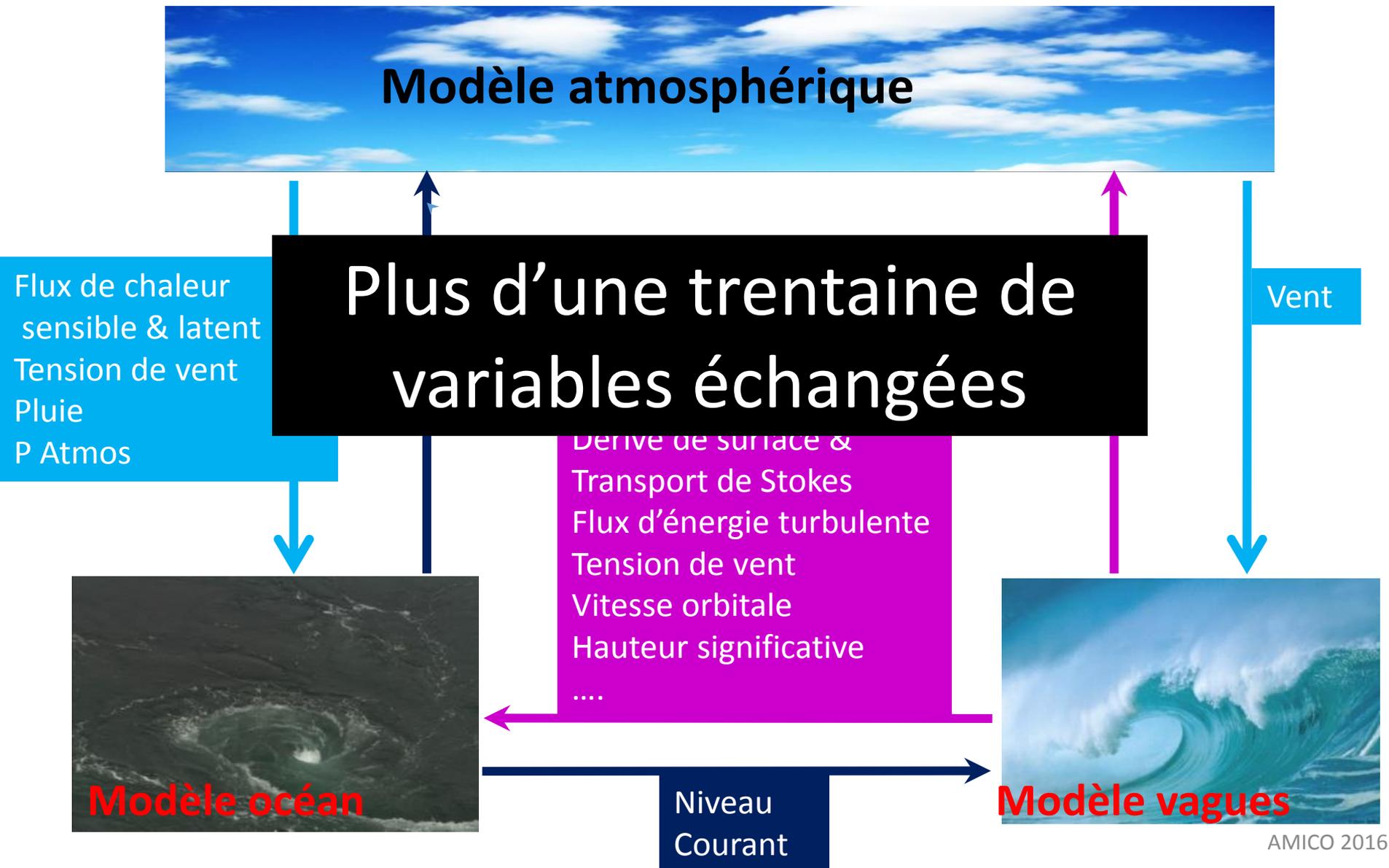
**Problème pour les modèles côtiers d'océan (maille du km ou plus):  
Champs atmosphériques actuels (Vent, température, ...) pour forcer les  
modèles d'océan sont issus de prévision météo utilisant des  
températures de la mer avec des résolutions trop laches (50 km)**

**Résolution meilleure de la SST que celle des modèles de PNT est nécessaire  
(même à 2.5 km de résolution ...)**

**=> Utilisation observations satellites ou sorties de modèle d'océan**

**=> Couplage océan-atmosphère peut être nécessaire (ajustement rapide de  
l'atmosphère)**

# Module générique de couplage atmosphère-vagues-océan



Modèle de recherche MESO-NH (CNRS & Météo-France)  
Modèles opérationnels Arpège et Arome de Météo-France

## Modèles d'atmosphère

SURFEX

Coupleur OASIS-MCT

Modèle hydrologique

Modèles d'océan  
MARS3D, NEMO,  
Symphonie

Modèle de vagues

WW3, WAM

Collaboration CNRM-LOPS-LA-LACy-CERFACS

Voltaire et al, GMD 2017

Intégration dans les dernières versions des codes

Applications climat global, prévision, régional, côtier, événements extrêmes

# Maquette du modèle couplé atmosphère-vagues-océan sur la mer d'Iroise (campagne expérimentale FroMVar 2011)

## Atmosphère MesoNH

dx/dy : 1.25 km

Niveaux vert: 100

dt = 10s

## Océan MARS3D

dx/dy : 500m

Niveaux vert: 40

dt = 20s

## Vagues WW3

dx/dy : 1.5 km

Nb de freq : 32

Nb de direction : 24 (15° )

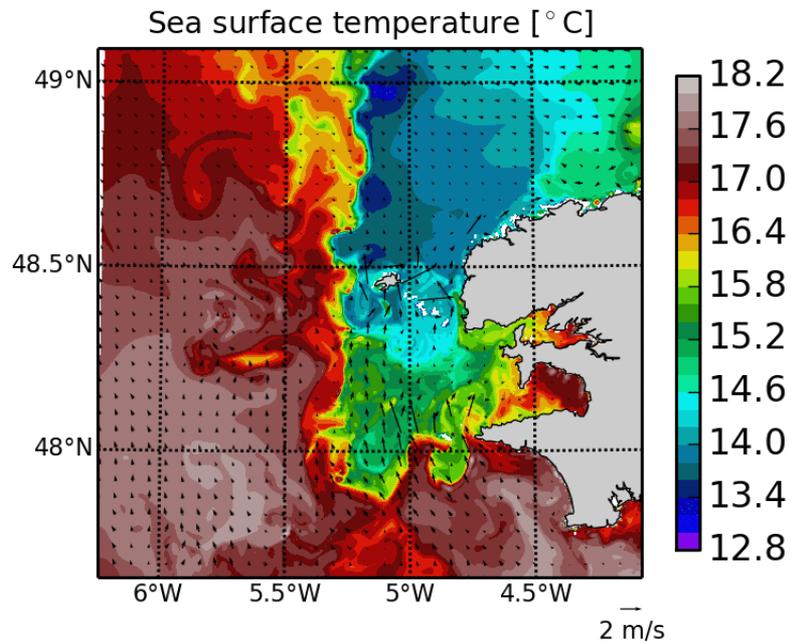
dt = 10s

Echanges toutes les 100s

Courant en surface: Flèches

Température Mer: couleur

FroMVar 2011  
02-09-2011 02:46



# Maquette du modèle couplé atmosphère-vagues-océan sur la mer d'Iroise (campagne expérimentale FroMVar 2011)

## Atmosphère MesoNH

dx/dy : 1.25 km  
Niveaux vert: 100  
dt = 10s

## Océan MARS3D

dx/dy : 500m  
Niveaux vert: 40  
dt = 20s

## Vagues WW3

dx/dy : 1.5 km  
Nb de freq : 32  
Nb de direction : 24 (15°)  
dt = 10s

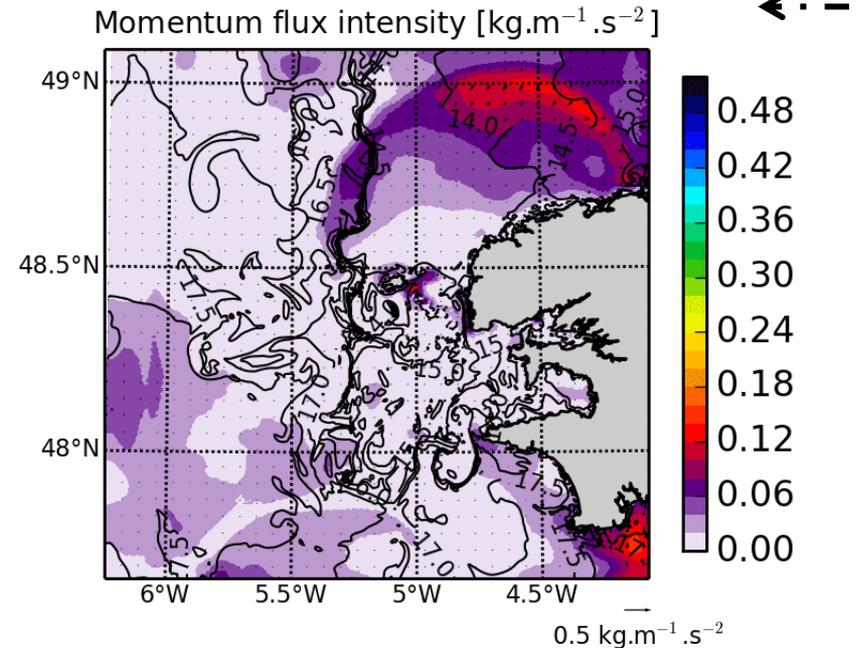
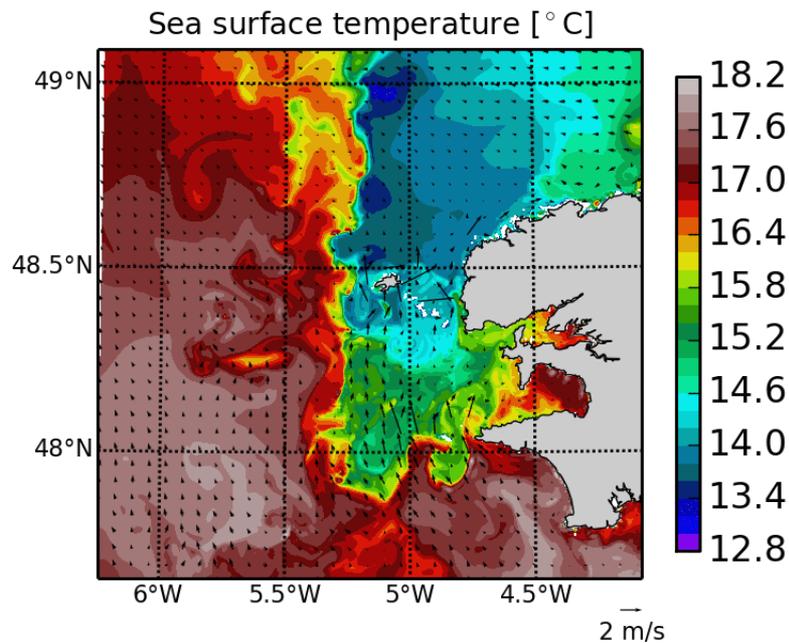
Echanges toutes les 100s

Courant en surface: Flèches  
Température Mer: couleur

Tension de vent  
Couleur et Flèches

FroMVar 2011  
02-09-2011 02:46

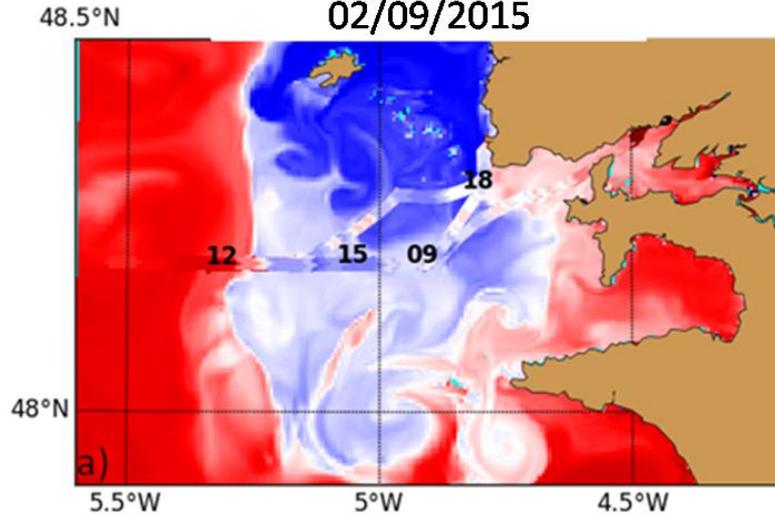
Isolignes:SST



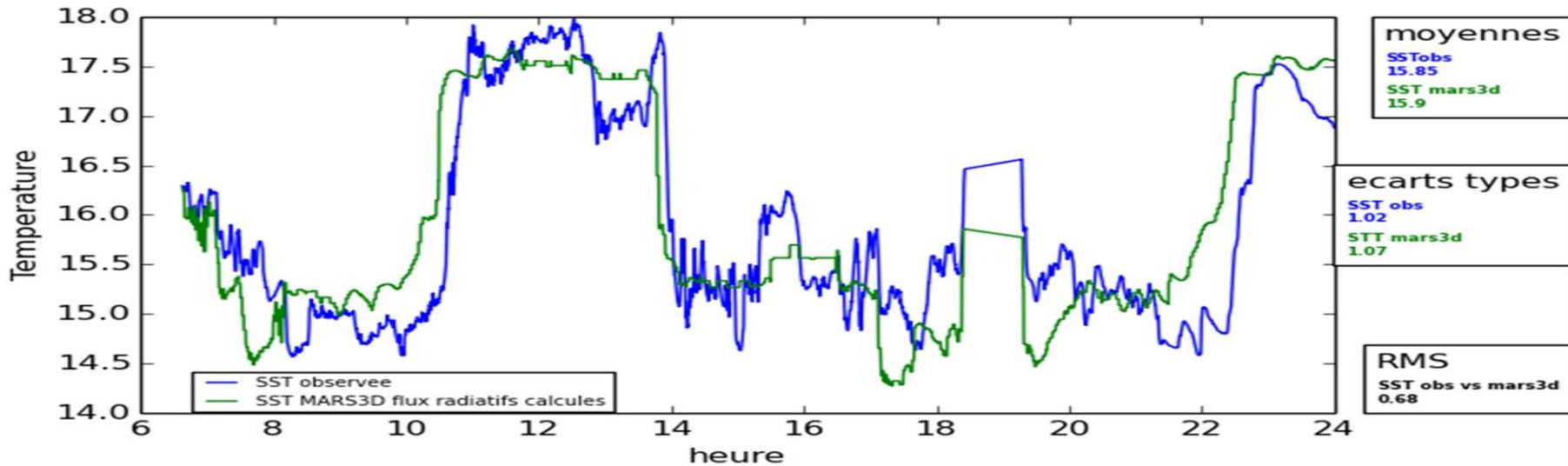
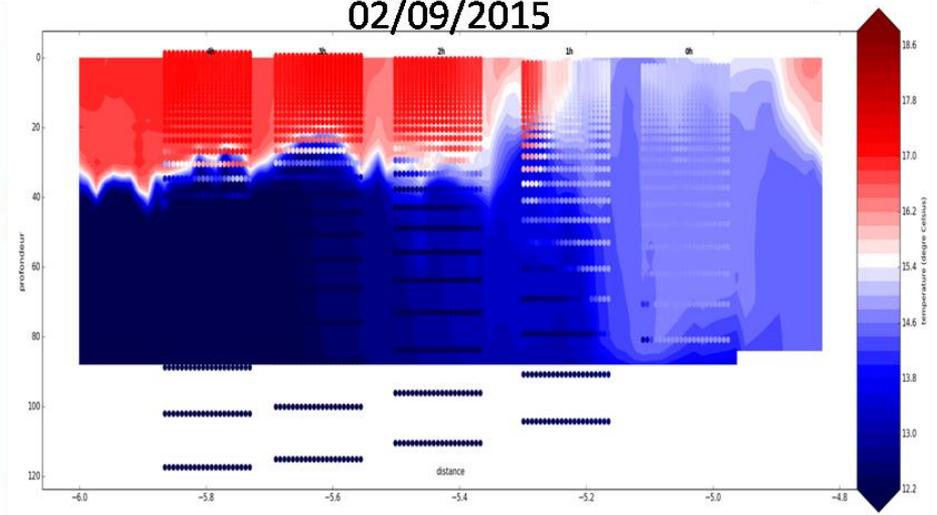
# Evaluation avec données de la campagne de mesures

## Modèle d'océan (MARS3D)

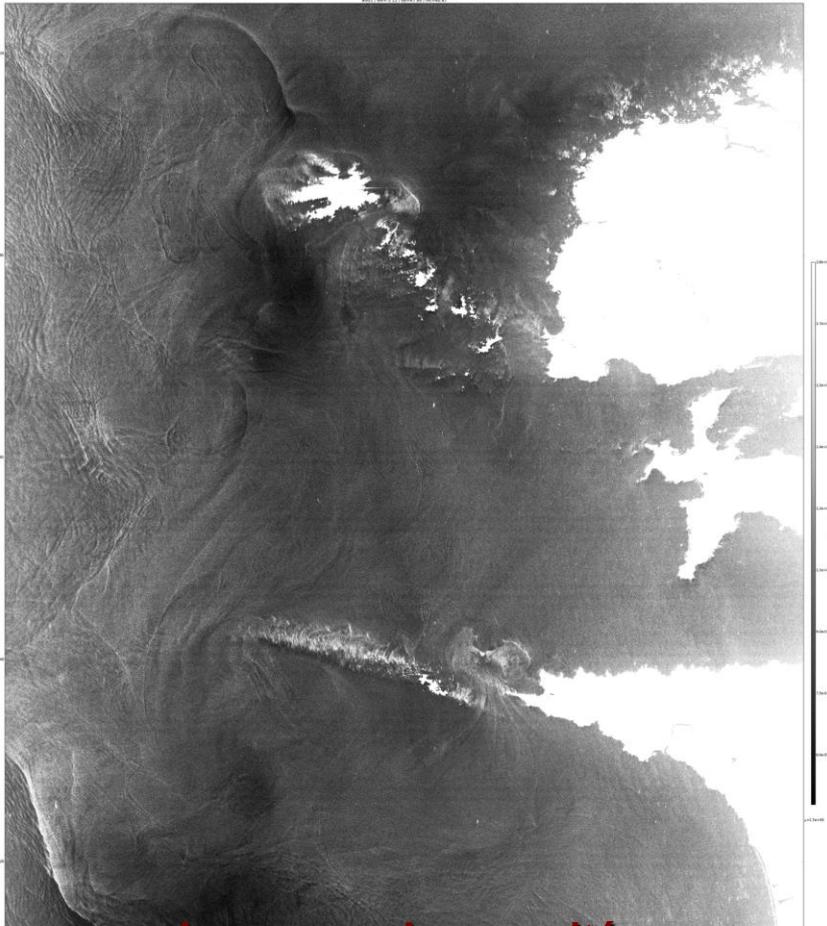
Température de Surface :  
02/09/2015



Température le long de section Scanfish:  
02/09/2015

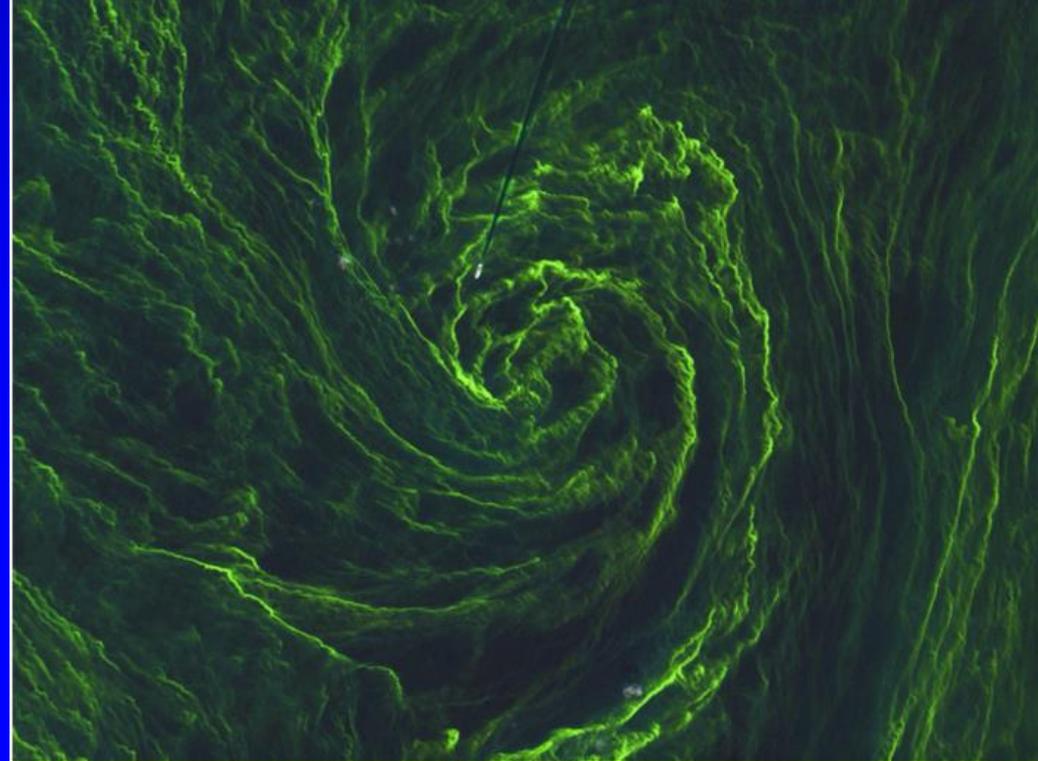


# Vers la très haute résolution



**Longueur de rugosité  
(Etat de mer, Vent)  
~ 100m résolution**

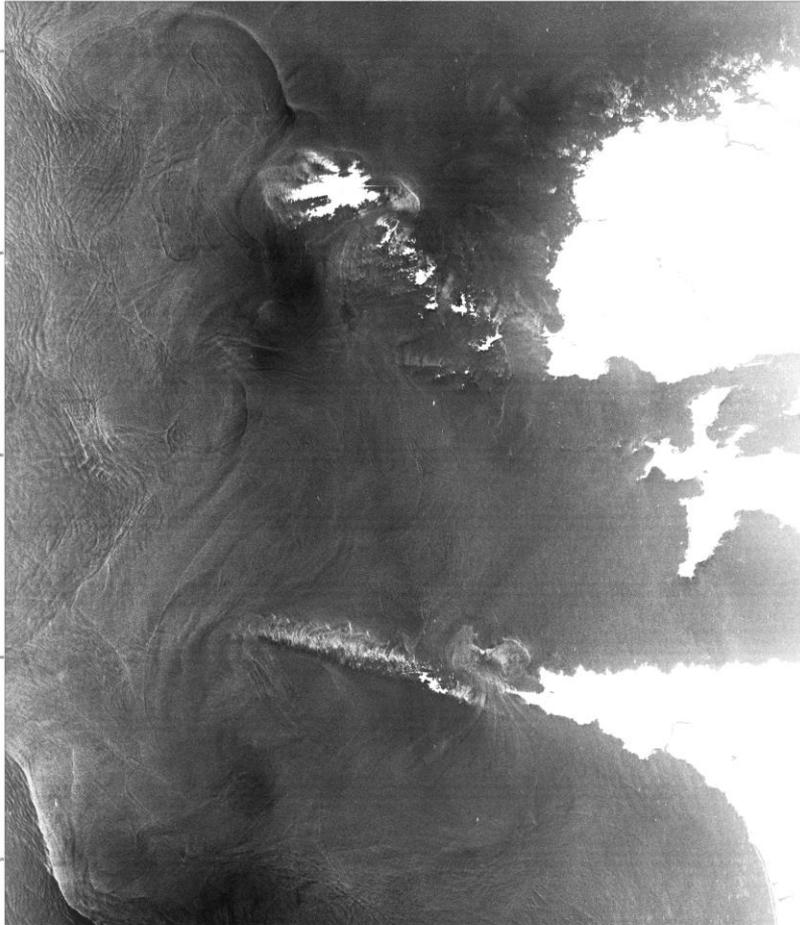
**Sentinel 1A/COPERNICUS/SAR  
2015**



**~ 10km**

**Couleur de l'eau (chlorophylle)  
~ 10m résolution  
Sentinel-2A  
2015**

# Vers la très haute résolution



**Longueur de rugosité  
~ 100m résolution**

**Sentinel 1A/COPERNICUS/SAR  
2015**



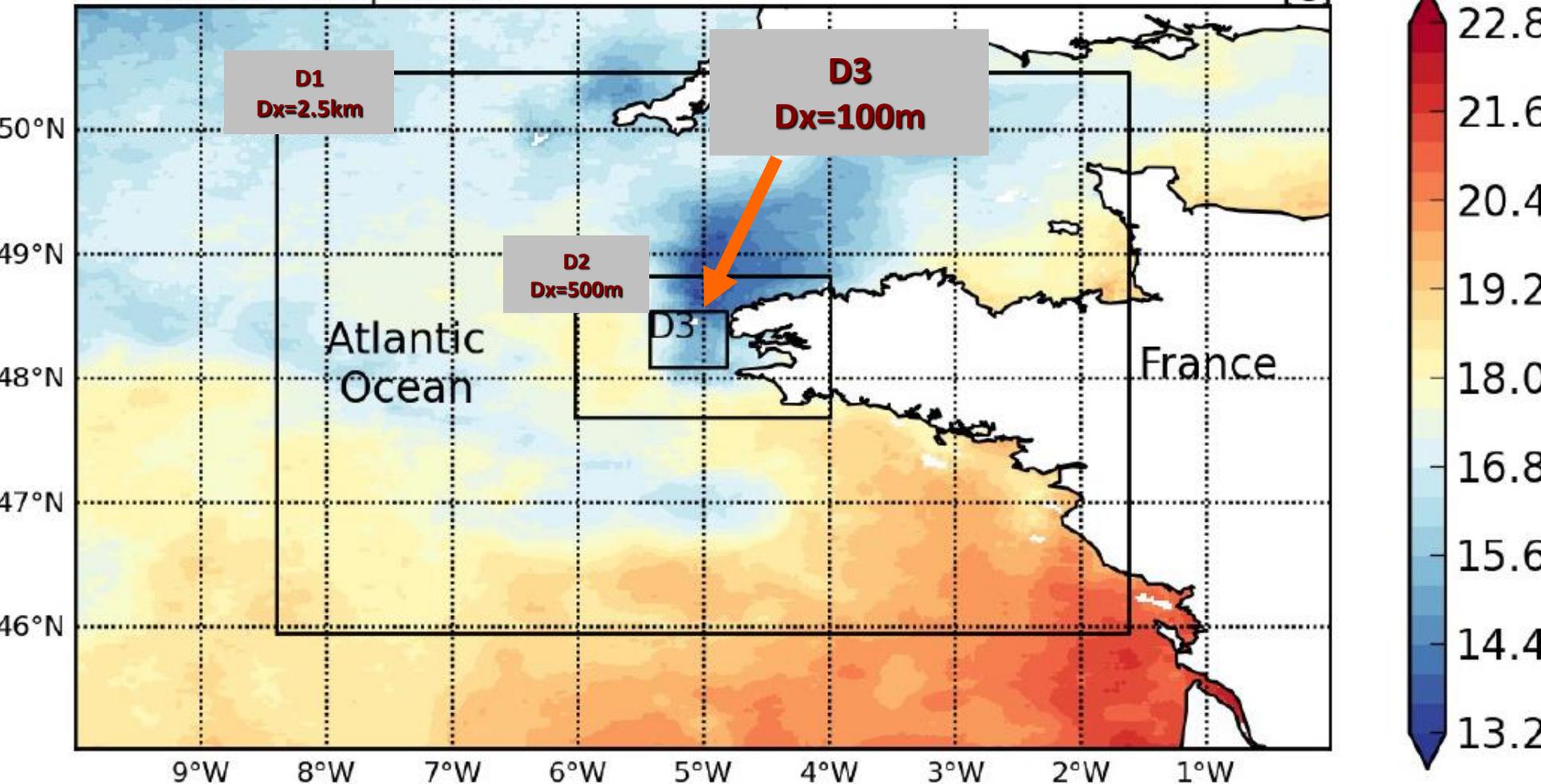
**Température de l'eau  
~ 5m résolution**

**Landsat / IR thermique  
2014**

# Vers la très haute résolution (100m)

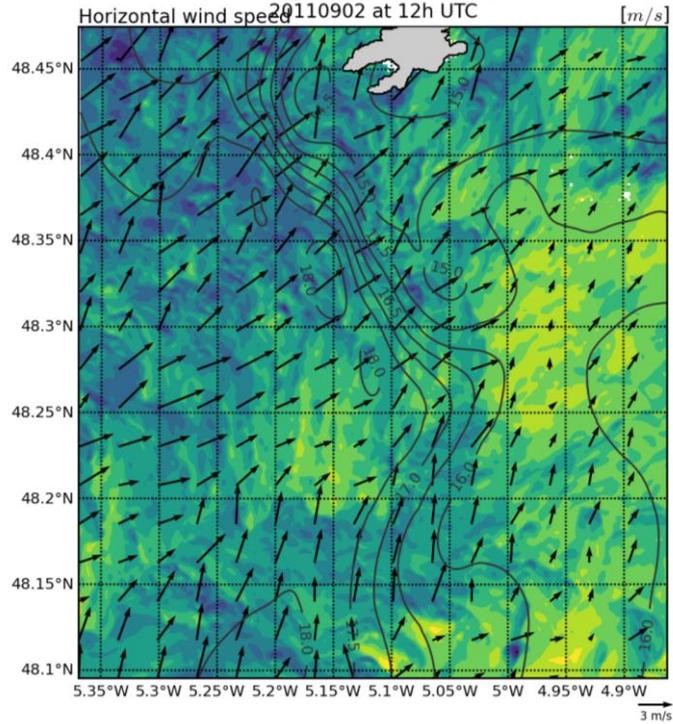
Exemple de descente d'échelles atmosphériques

Sea Surface Temperature [C]



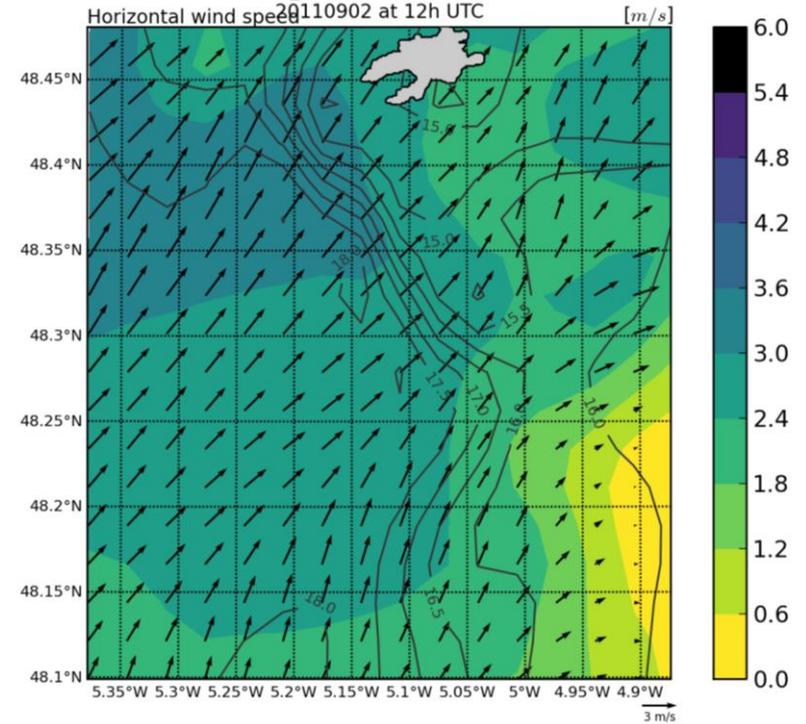
**Dx=100m**

Domaine\_100M M2P5M at z(1)=5.0



**Dx=2500m**

Domaine\_2500M M2P5M at z(1)=5.0



Wind (colour & arrows) at 12 UTC on D3

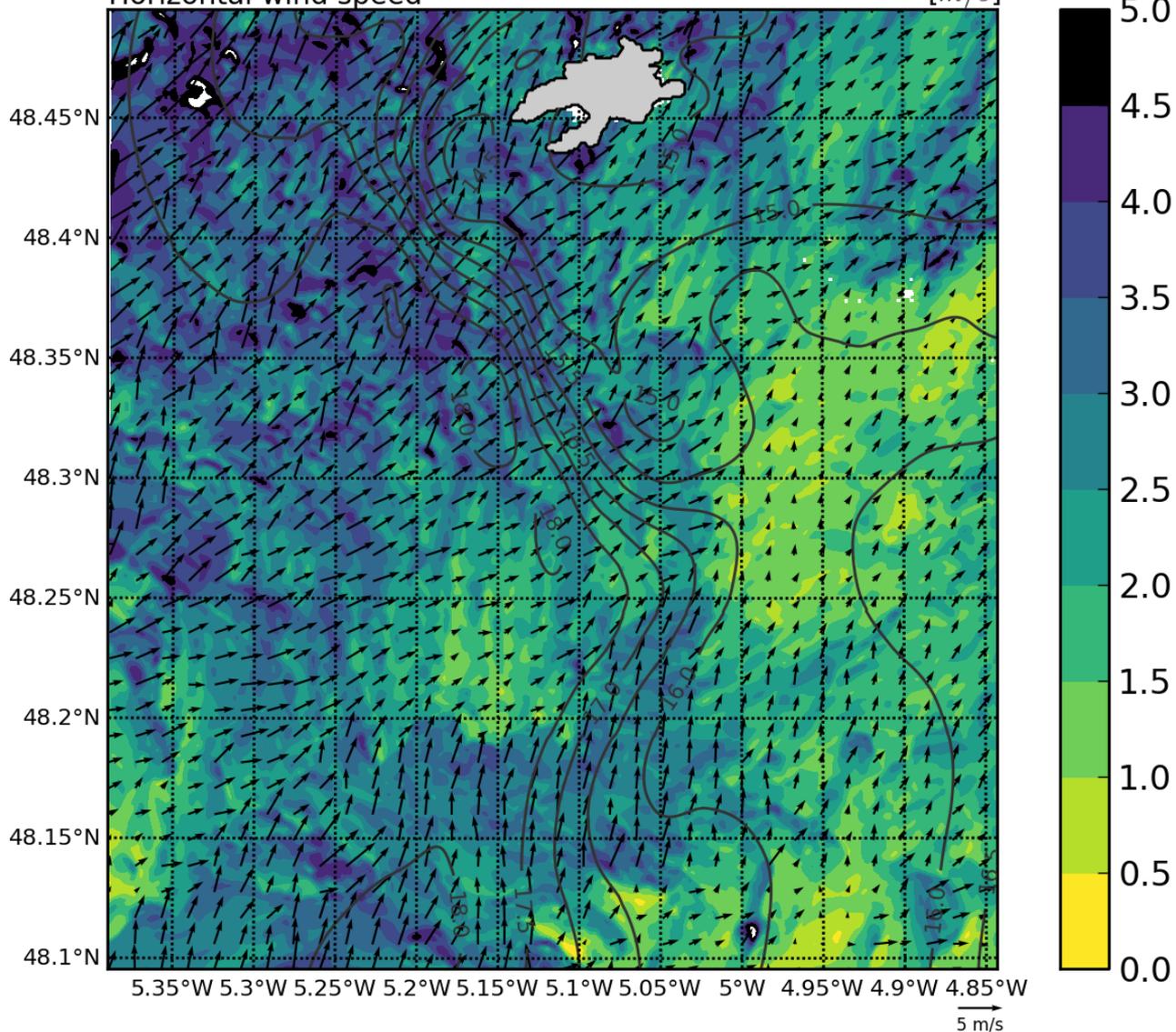
Dx=100m

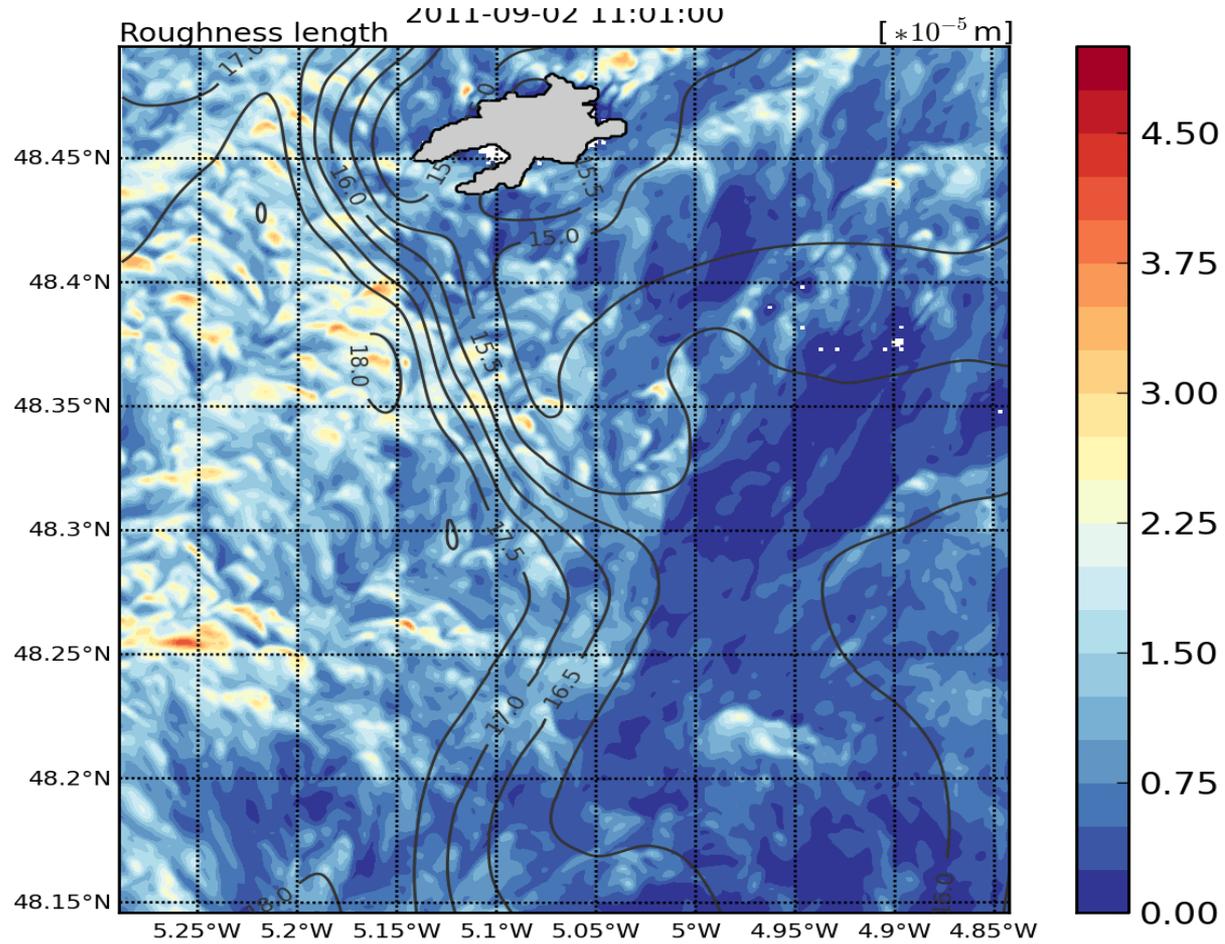
Domaine\_100M M2P5M at z(1)=5.0

20110902 at 12h UTC

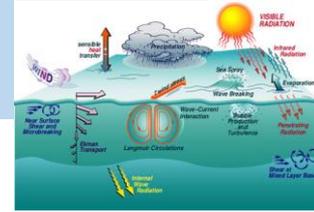
Horizontal wind speed

[m/s]





## Résultats



- Outil générique de couplage côtier atmosphère-vagues-océan (diffusé et utilisé à l'extérieur du projet)
- Amélioration modèle de vagues permettant de mieux représenter les tensions de vent (vent fort, petit fond, ..)
- Système couplé Mer d'Iroise (résolution du km)
- Prototypes de système couplé pour permettre de descendre aux échelles horizontales fines (100m) : en cours sur la Mer d'Iroise et sur la Méditerranée

- 
- Résolution spatiale de SST impacte fortement les champs atmosphériques  
⇒ Produits de la Prévision Météo pour forcer les modèles côtiers d'océan peuvent présenter des biais et sous-estimer les maxima
  - Différentes échelles de variabilité simulés & observés des échanges à l'interface => Valeurs moyennes dépendent de l'échelle donnée => A prendre en compte dans modèles d'océan pour le forçage/couplage avec vagues et atmosphère

Le soutien **AMICO** a permis de soutenir une recherche amont pour l'OCO :

- En développant et évaluant les premières « briques » scientifiques de futurs systèmes opérationnels couplés côtiers
  - **Couplages liés à la nécessaire descente d'échelles**
    - Couplage d'échelles de la circulation océanique régional-côtier
    - Couplage d'échelles physique-BioGéoChimie hauturier-régional-côtier
    - Couplage entre atmosphère, vagues et océan
  - **Outils génériques les plus proches de ceux utilisés en opérationnel**, en associant acteurs scientifiques et opérationnels au travers de chantiers intégrés pilotes

## Deuxième phase en cours (2017-2018)

- Intégration des efforts développés durant la première phase
- Application sur deux sites pilotes contrastés où on s'attend à des comportements différenciés:
  - **Mer d'Iroise** : Processus macrotidaux et frontaux (Front d'Ouessant) intenses, vagues, houle, ...
  - **Méditerranée**: Zone de remontées d'eaux froides intermittentes (importance du vent), marée faible, ...
- Evaluation avec observations de routine et campagnes dédiées