

Modélisation du lien entre apports de NO_3 et PO_4 (pression) et biomasse algale (état).

Application au calcul des $[\text{NO}_3]$ et $[\text{PO}_4]$ maximales admissibles dans les fleuves de Manche-Atlantique pour assurer le Bon Etat Ecologique des zones côtières (objectifs DCE et DCSMM).

Alain Ménesguen

Unité « **DYN**amiques de l'**ENV**ironnement **COT**ier », IFREMER/Brest/France

Morgan Dussauze

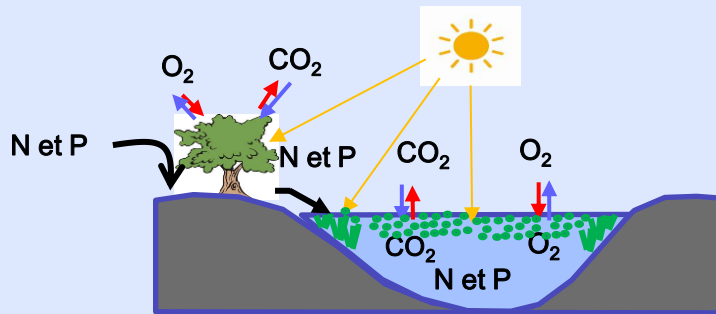
ACTIMAR/Brest/France

Projets ONEMA/IFREMER et
FP7/SeasERA/EMoSEM

Plan

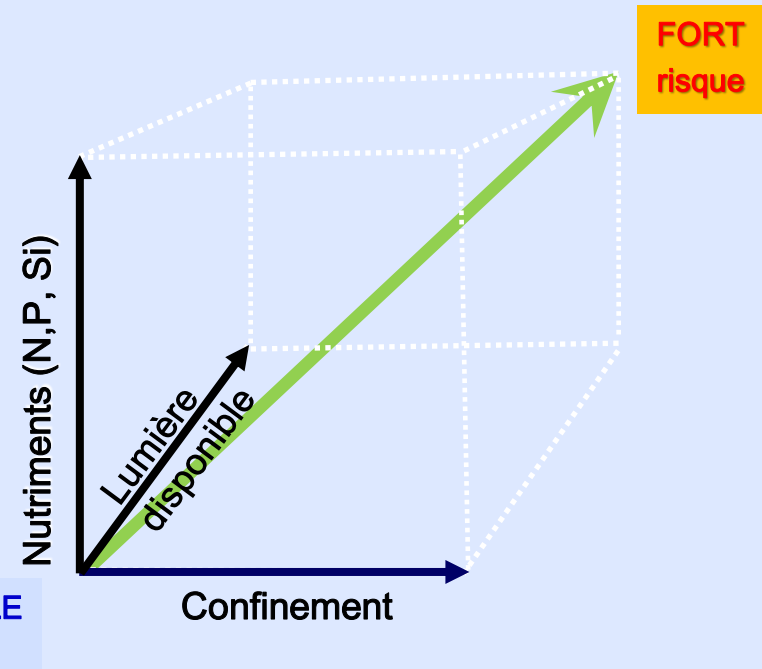
- Le mécanisme de l'eutrophisation
- La question posée par la DCE et la DCSMM
- L'outil pour répondre : le modèle ECO-MARS3D
- La réponse pour l'indicateur « Marées vertes à ulves »
- La réponse pour l'indicateur « Nutriments hivernaux »
- La réponse pour l'indicateur « Chlorophylle planctonique estivale »
 - Approche statistique prenant en compte lumière et rapports N/P des nutriments (projet EMOSEM)
 - Approche déterministe prenant en compte temps de résidence, lumière et rapports N/P des nutriments (en cours)
- Conclusion

Le mécanisme de l'eutrophisation



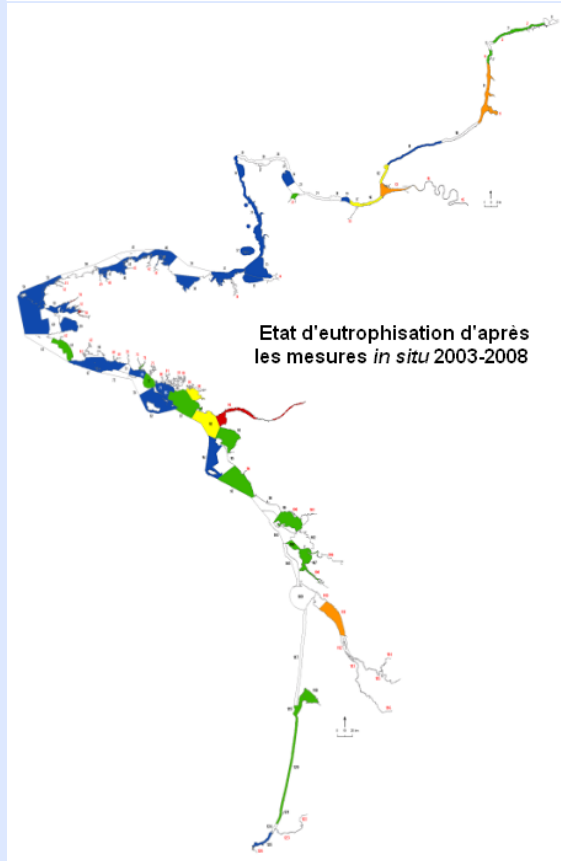
Facteurs favorisant l'eutrophisation :

- ✓ Long temps de résidence de l'eau
- ✓ Eclairage important de la couche d'eau
- ✓ Apport important de nutriments
- ✓ Température élevée

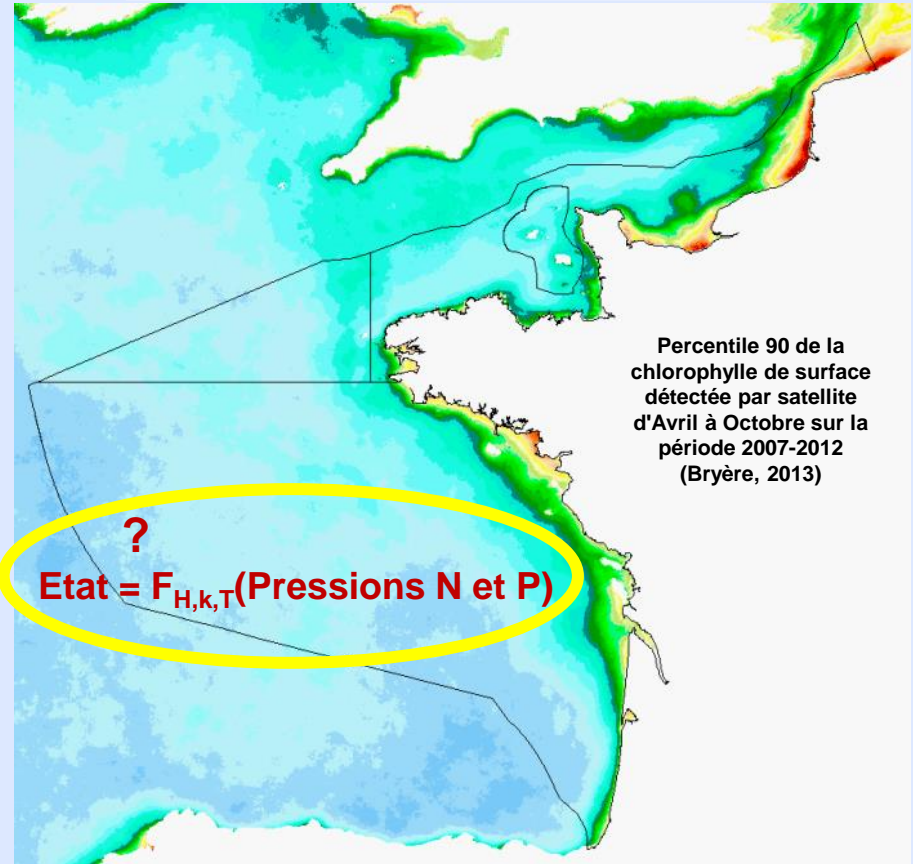


L'état actuel d'eutrophisation de Manche-Atlantique et la question posée par DCE et DCSMM

DCE: 73 masses d'eau côtières



DCSMM : 3 sous-régions étendues



Peut-on trouver la fonction qui donne un descripteur d'état eutrophique marin en fonction de $[NO_3]$ et $[PO_4]$ des fleuves ?

Peut-on inverser cette fonction pour calculer les $[NO_3]$ et $[PO_4]$ maximales admissibles dans les 45 fleuves français pour revenir partout au Bon Etat Ecologique ?

Les difficultés méthodologiques de la réponse

- Quel descripteur écologique utiliser pour définir l'état d'eutrophisation marine?

- ➔
- Percentile 10 de $[O_2]$ au fond ?
 - Percentile 90 de [toxine] ? (ASP, DSP, PSP ?)
 - Nombre de blooms phyto par an, de toutes espèces ou d'espèces nuisibles ?
 - Percentile 90 de [chlorophylle] en surface ? Sur la colonne d'eau ?
sur l'année ou de mars à octobre ?
 - Richesse nutritive hivernale moyenne ?

- Quelles valeurs maximales de ces descripteurs marins pour respecter le B.E.E?

- ➔
- Pas de seuil pour les nutriments
 - Pas de seuil européen unique pour oxygène et chlorophylle
 - Seuils différents dans un même pays selon les côtes !
 - Seuil sanitaire de toxine uniquement dans les mollusques et poissons

- Quelle est la cible marine ?

- ➔
- Une seule masse d'eau DCE ?
 - Toutes les masses d'eau DCE ensemble ?
 - Une sous-région DCSMM ?

- Quel est le prix à payer pour une réduction d' 1mg/L NO_3 ou PO_4 dans un fleuve?

- ➔
- Pas d'estimation de coût réel disponible

Les difficultés scientifiques de la réponse

- Quelles variables causales faire intervenir dans la fonction?



Débits et concentrations $[\text{NO}_3]$ et $[\text{PO}_4]$ des fleuves

fonction linéaire

$[\text{NO}_3]$ et $[\text{PO}_4]$ hivernales marines

+ turbidité minérale

+ épaisseur de couche mélangée de surface en été

+ temps de résidence local

fonction NON-linéaire

$[\text{Chloro}]$ estivale marine en surface

+ épaisseur de couche mélangée de fond en été

fonction NON-linéaire

$[\text{O}_2]$ estivale marine au fond

- Comment établir la fonction?



- Sur une base statistique à partir des cartes actuelles mesurées ou simulées des variables causales et des descripteurs
- A partir d'une théorie de l'eutrophisation (modèle 0D)

- La fonction pourra-t-elle être linéarisée par rapport à $[\text{NO}_3]$ et $[\text{PO}_4]$ des fleuves?

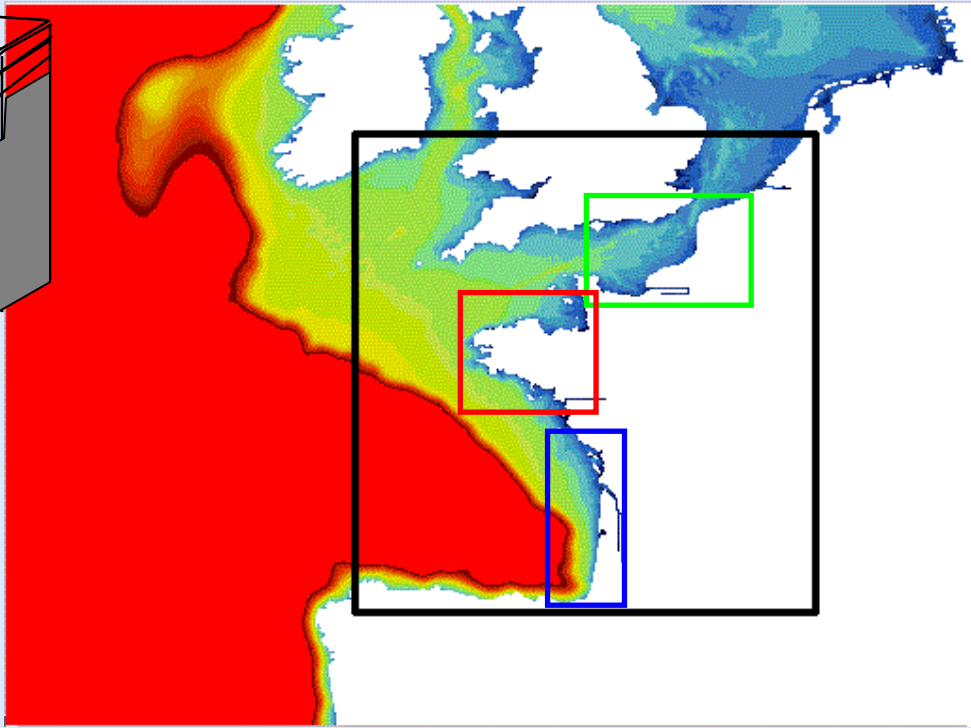
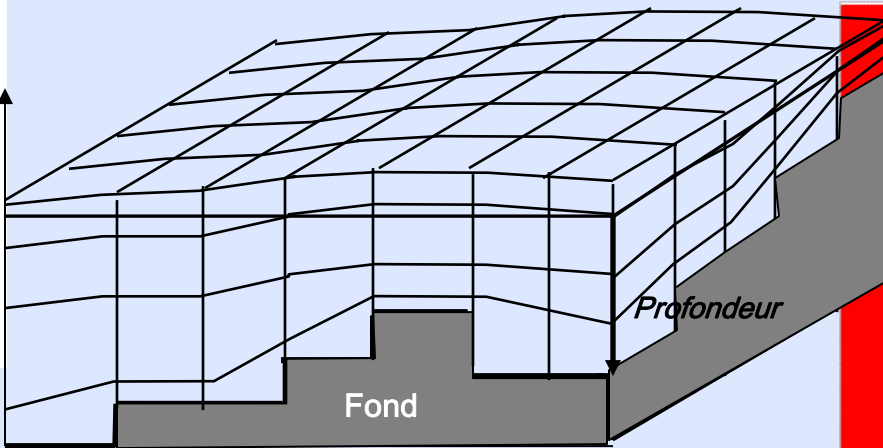


Pas de calcul de réductions optimales si pas de linéarisation

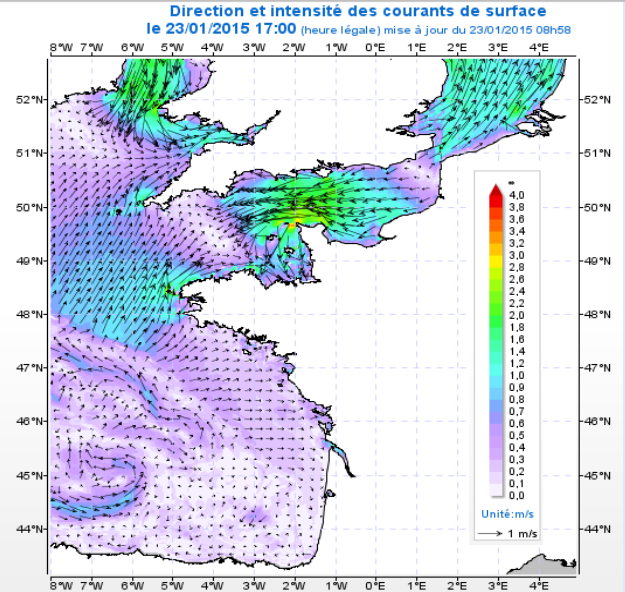
L'outil de modélisation : ECO-MARS3D

1/ Hydrodynamique

Découpage de l'espace marin en une grille 3D



Calcul des courants, température, salinité

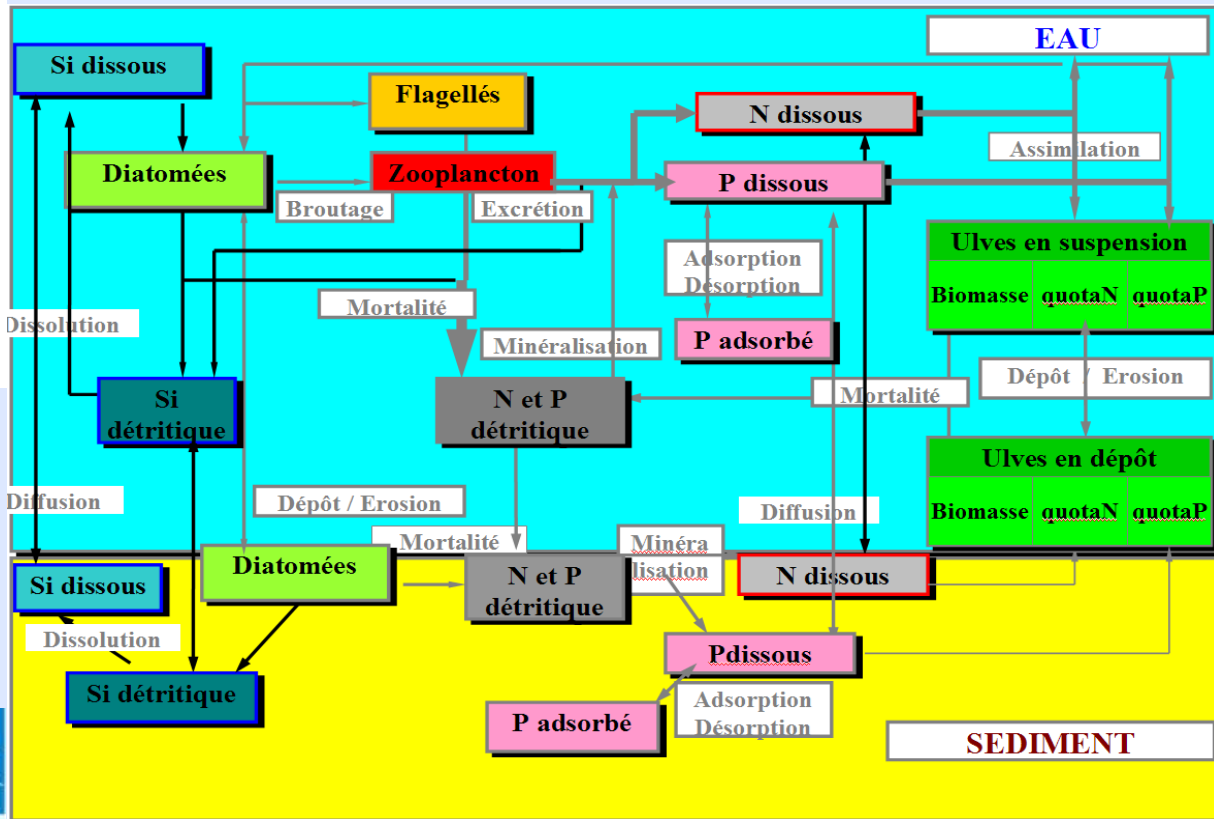


Grilles de base MANGA → 4x4 km
 (Etendue: 514 x 390 x 30, Restreinte: 244 x 265 x 30 mailles)

Grilles régionales → 1x1 km
 (Manche-est: 343 x 229 x 10, Bretagne: 299 x 248 x 15,
 Landes: 183 x 431 x 30 mailles)

L'outil de modélisation : ECO-MARS3D

2/ Biogéochimie de base

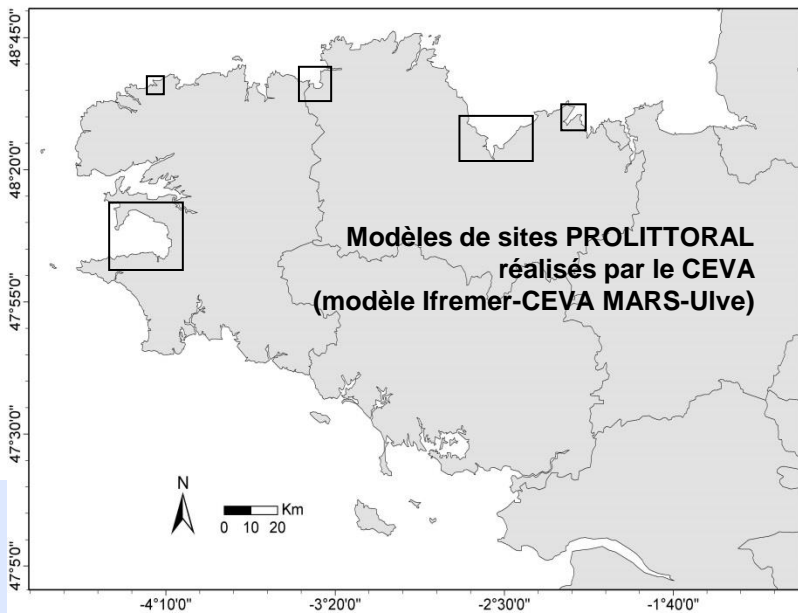


Modèle de base :

- 4 éléments (N, P, Si, O)
- diatomées
- dinoflagellés
- nanoflagellés
- *Phaeocystis globosa*
- *Ulva armoricana*
- micro-zooplancton
- méso-zooplancton
- détritique benthique

Réponse pour le descripteur « marées vertes »

La réponse pour les «marées vertes» à ulves (globale)

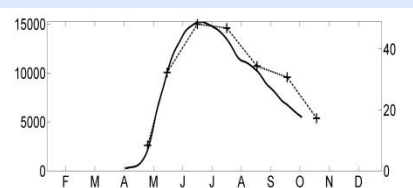
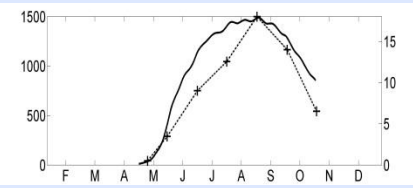
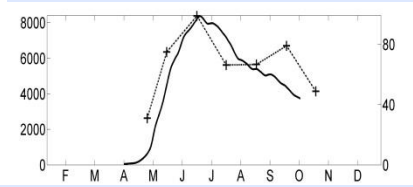
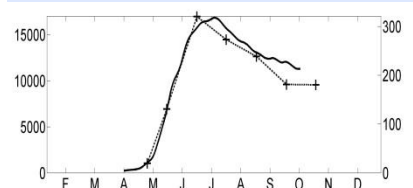
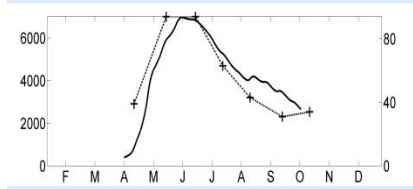


	Lannion 2005	Douarnenez 2005	St-Brieuc 2002	Guissény 2005	Fresnaye 2004
5 mg/L	69	77	54	71	74
10 mg/L	51	60	41	53	62
15 mg/L	36	44	30	41	51
20 mg/L	23	29		31	42
25 mg/L	13	15		25	31
30 mg/L	6	8		18	24

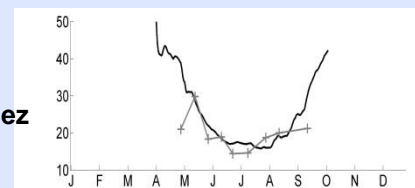
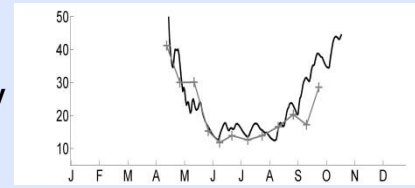
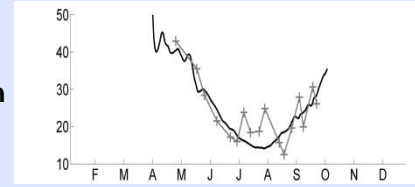
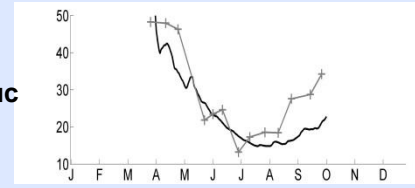
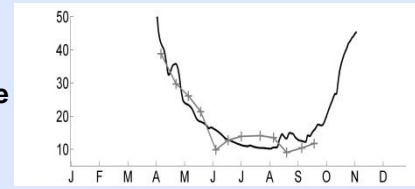
Abattement simulé (%) de la marée verte en fonction de la teneur des rivières en nitrate

Pour diminuer la marée verte de moitié, il faut ramener les rivières en-dessous de 10mg/L NO₃

Recouvrement mesuré (ha) et biomasse simulée (tonnes poids frais)



Teneur des ulves en azote (‰ poids sec) mesurée et simulée



Fresnaye

St Brieuc

Lannion

Guissény

Douarnenez

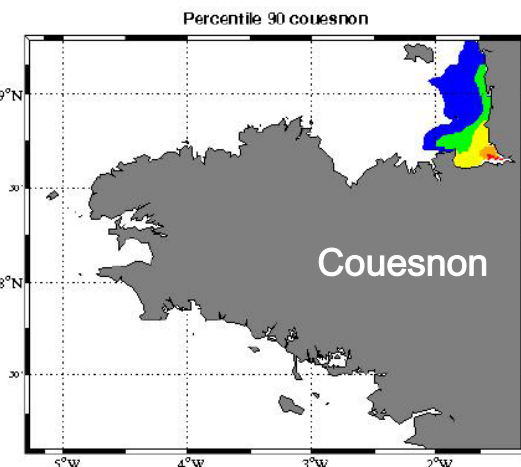
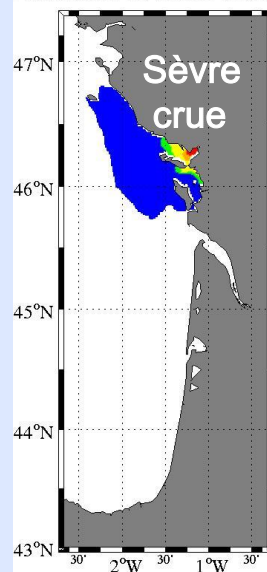
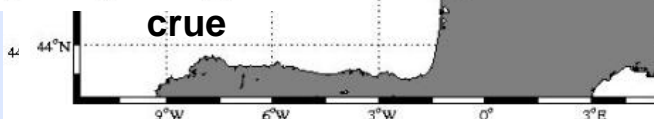
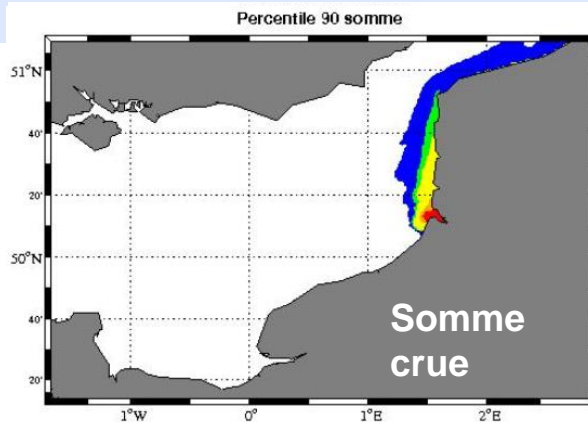
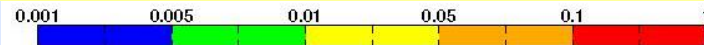
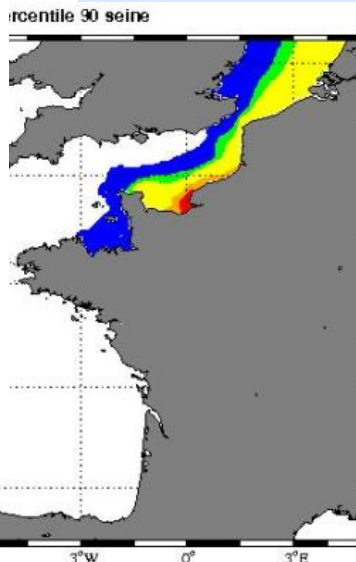
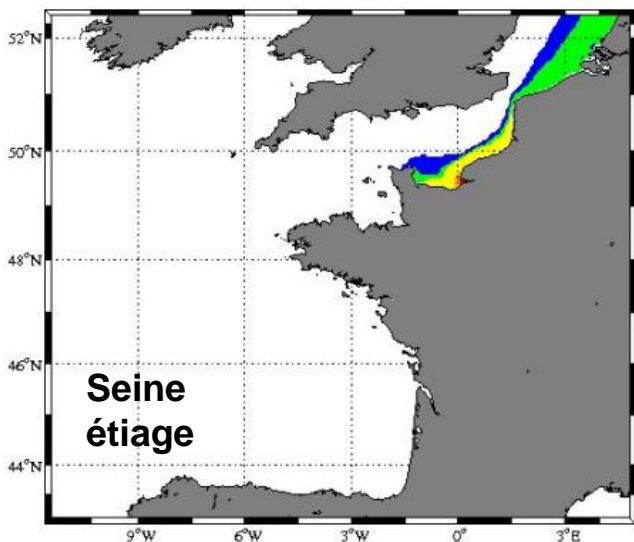
Réponse pour le descripteur nutriments hivernaux

La réponse pour le descripteur « nutriments hivernaux »

Etape 1: Détermination des « Bassins récepteurs marins » des BV terrestres

Hypothèse de base :

En hiver, les nutriments sont des traceurs conservatifs qui se diluent comme l'eau douce des panaches de fleuves



Grands bassins versants
(grille à mailles 4x4km)

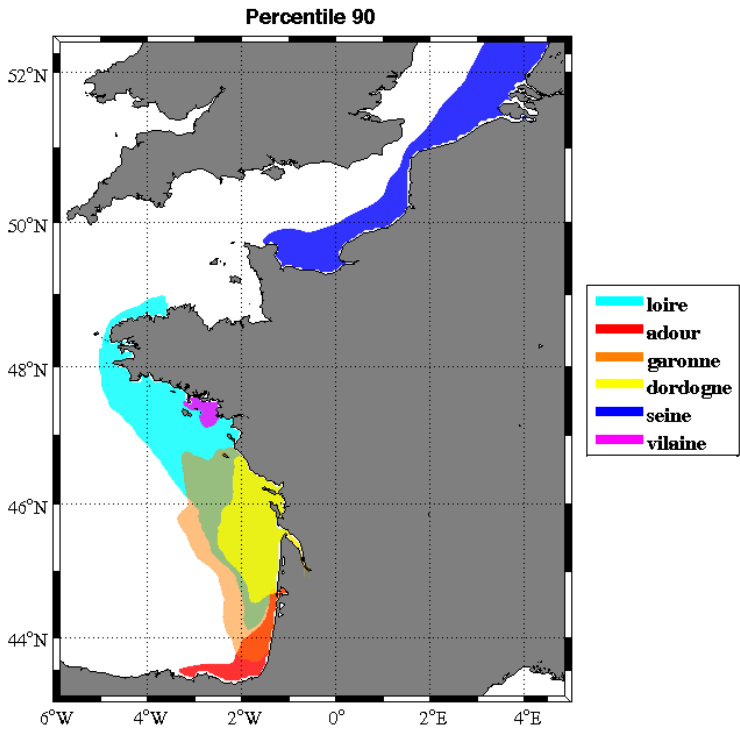
Plus petits bassins
versants (zooms à 1x1 km)

La réponse pour le descripteur « nutriments hivernaux »

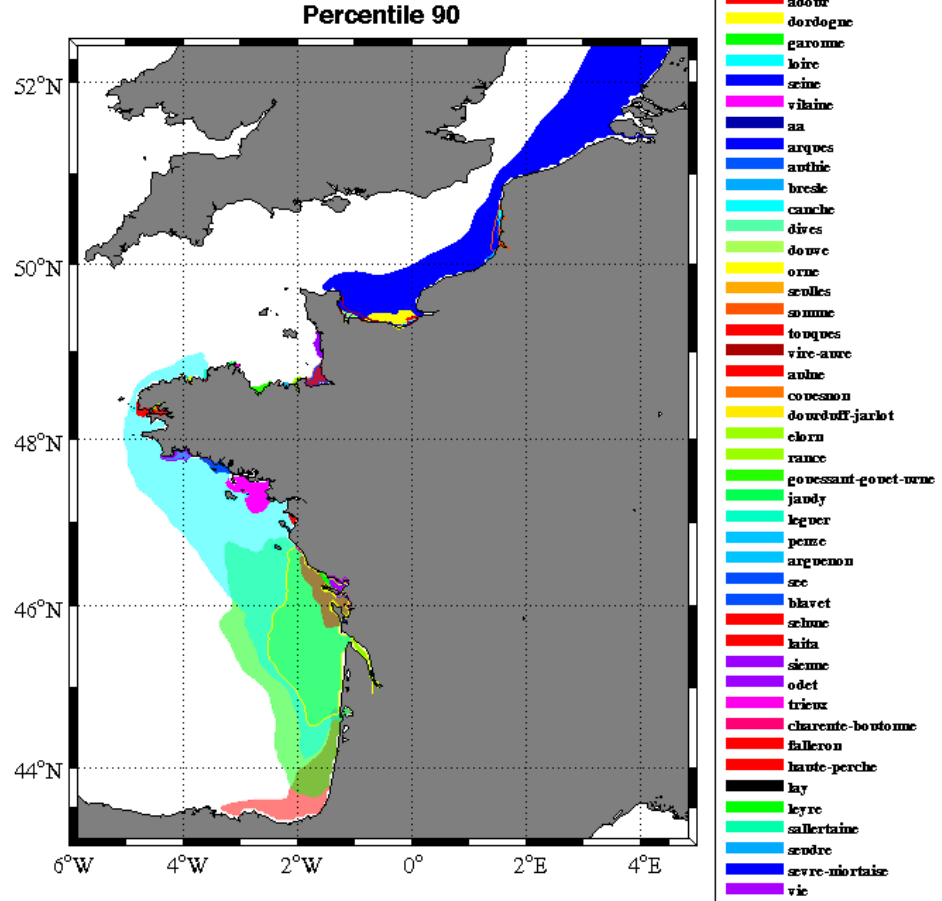
Etape 1: Détermination des « Bassins récepteurs marins » des BV terrestres

Cartographie synthétique des « Bassins récepteurs marins » de Manche-Atlantique

Panaches de crue délimités par leur isodilution 100 fois



Les 6 fleuves majeurs en crue



Les 45 fleuves principaux en crue

La réponse pour le descripteur « nutriments hivernaux »

Etape 2 : déterminer les concentrations optimales des fleuves

Hypothèses préalables

Fondement: En hiver, en toute maille marine , $[NO_3]$ (resp. $[PO_4]$) est la somme des 45 concentrations fluviales + de la concentration océanique, pondérées par leurs dilutions

- Quelle est la concentration marine en nitrate maximale qui respecte le B.E.E?



Pas de seuil européen unique

Choix : Très Bon Etat : $15 \mu\text{mol/L}$ (0.93 mg/L) NO_3

$1 \mu\text{mol/L}$ (0.095 mg/L) PO_4

Bon Etat : $30 \mu\text{mol/L}$ (1.86 mg/L) NO_3

$2 \mu\text{mol/L}$ (0.19 mg/L) PO_4

- Quel est le prix à payer pour une réduction d'1mg/L NO_3 dans un fleuve?



Pas d'estimation de coût réel disponible

Choix: Proportionnel à la superficie du Bassin Versant

- Quelle est la cible marine ?

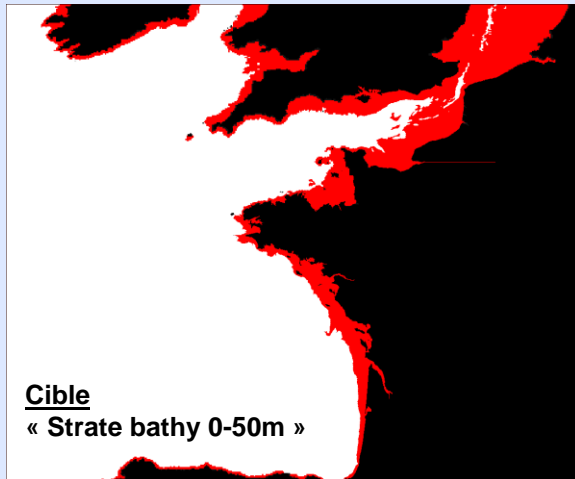


Chaque masse d'eau DCE prise isolément

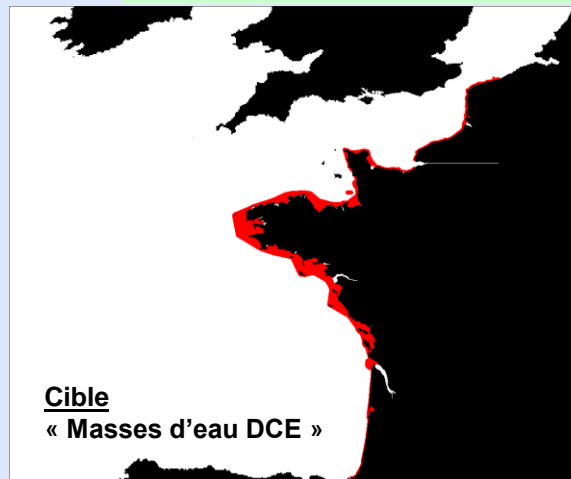
Toutes les masses d'eau DCE ensemble

Chaque sous-région DCSMM prise isolément

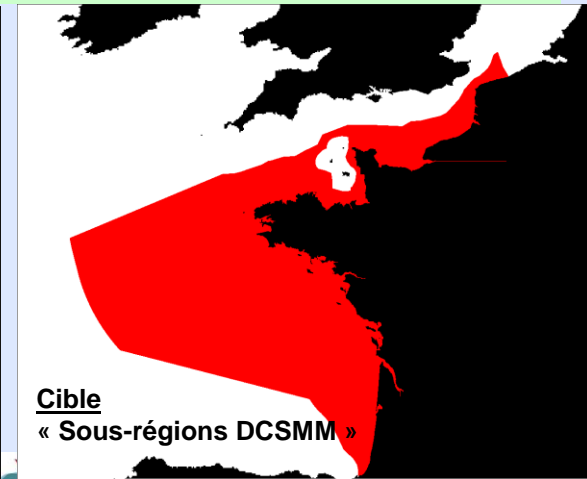
La strate bathymetrique 0-50m



Cible
« Strate bathy 0-50m »



Cible
« Masses d'eau DCE »



Cible
« Sous-régions DCSMM »

La réponse pour le descripteur « nutriments hivernaux »

Etape 2 : déterminer les concentrations optimales des fleuves

Algorithmes

Principe : chercher la baisse minimale de concentration dans chaque fleuve qui assure le BEE en toute maille marine qui serait capable du BEE en situation pristine

Moyenne ou P90 ?

En mer, les panaches hivernaux des fleuves correspondent aux cartes de P90 de dilution...mais les blooms estivaux correspondent aux cartes de P10 de dilution

Dans les fleuves, les P90 de nitrate correspondent à l'hiver...mais ceux de phosphate à l'été

=> calculs faits en utilisant les cartes de dilution moyenne et une concentration moyenne dans les fleuves.

- Résolution « stricte » par le Simplexe de Dantzig



Toute maille passable en BEE le sera

Le coût à minimiser est la somme sur les 45 fleuves du produit (abattement de concentration x surface du BV)

- Résolution « tolérante » par l'optimisation quadratique de Beale



Toute maille passable en BEE sera rapprochée au mieux du BEE

Le coût à minimiser est :

somme sur les 45 fleuves du produit (abattement de concentration x surface du BV) + somme sur les mailles marines du carré de l'écart restant au BEE

La réponse pour le descripteur « nutriments hivernaux »

Etape 2 : déterminer les concentrations optimales des fleuves

Résultats : synthèse Manche-Atlantique sur NITRATE et PHOSPHATE :

Seuils proposés dans les fleuves au vu des seuls nutriments marins bruts :

TRES BON ETAT :

NO₃ : grands fleuves: 15→3 mg/L
petits fleuves : 24→8 mg/L

PO₄ : 0.28 →0.15 mg/L

BON ETAT :

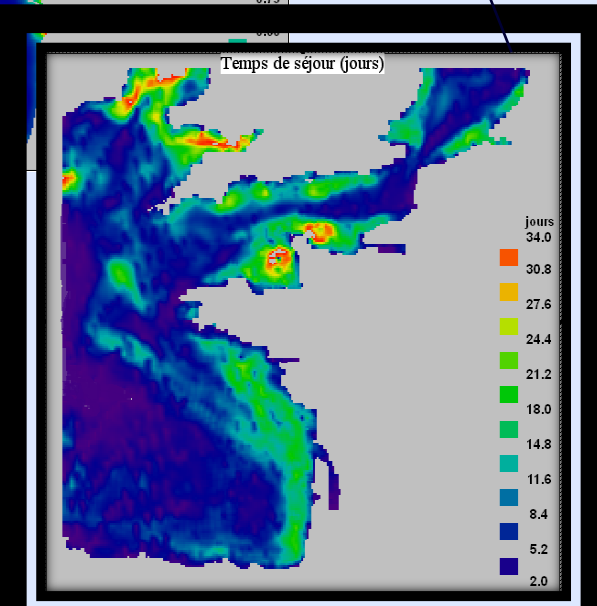
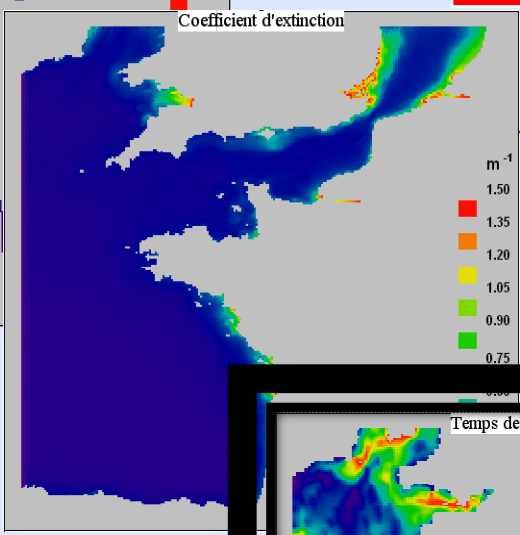
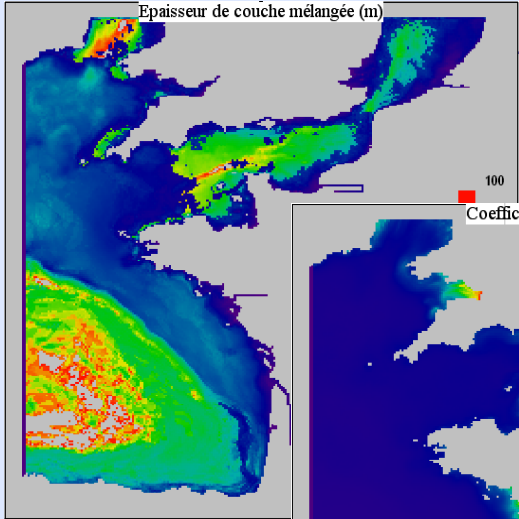
NO₃ : grands fleuves :15→5 mg/L
petits fleuves : 24→13 mg/L

PO₄ : 0.28 → 0.20 mg/L

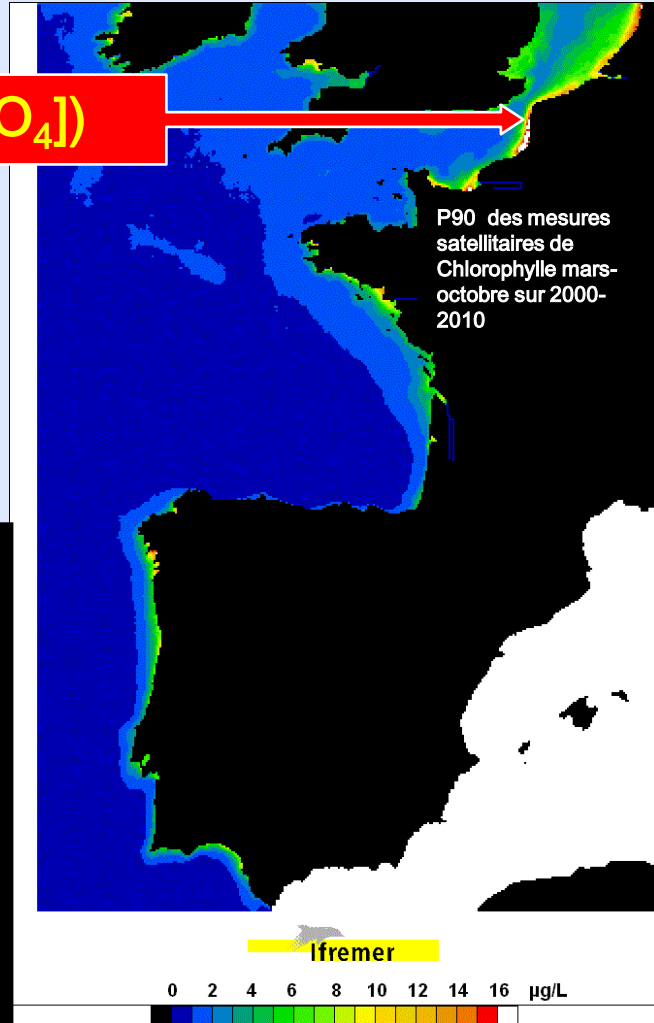
Réponse pour le descripteur phytoplancton de surface

La réponse pour le descripteur « phyto estival de surface »

Rassembler les cartes de variables causales et chlorophylle



$$F_{H,K,T}([NO_3], [PO_4])$$



La réponse pour le descripteur « phyto estival de surface »

Approche statistique : Introduction de la notion de nutriment « biodisponible »

Hypothèse déduite du “tripode de l’eutrophisation”:

Un nutriment va être utilisé seulement à proportion des limitations du site:

- limitation par la lumière en maille (i,j) :

le modèle fournit l'épaisseur H de la couche mélangée de surface et le coefficient d'extinction k

$$\text{light_lim}_{i,j} = 1 - e^{-k_{i,j} \cdot H_{i,j}} / (k_{i,j} \cdot H_{i,j})$$

- limitation par les autres nutriments en maille (i,j) :

le modèle fournit la concentration hivernale moyenne de surface pour NO₃ (DIN) et PO₄ (DIP)

$$\text{nutrient_lim_DIN}_{i,j} = \min(\text{DIN}_{i,j}, 16 \cdot \text{DIP}_{i,j}) / \text{DIN}_{i,j}$$

$$\text{nutrient_lim_DIP}_{i,j} = \min(\text{DIN}_{i,j} / 16, \text{DIP}_{i,j}) / \text{DIP}_{i,j}$$

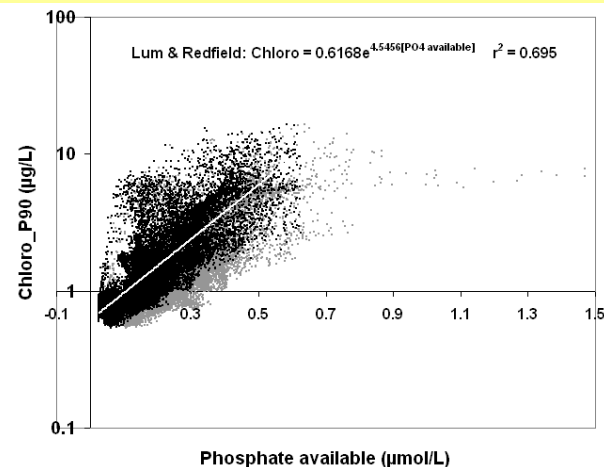
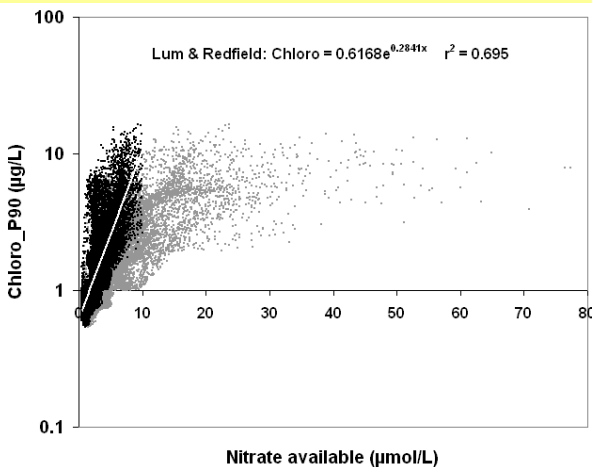
- limitation par le temps de résidence en maille (i,j) :

NON-PRIS EN COMPTE dans le projet EMOSEM, mais possible

Finalement, les nutriments “biodisponibles” en maille (i,j) sont:

$$\text{DIN_avail}_{i,j} = \text{DIN}_{i,j} \cdot \text{nutrient_lim_DIN}_{i,j} \cdot \text{light_lim}_{i,j}$$

$$\text{DIP_avail}_{i,j} = \text{DIP}_{i,j} \cdot \text{nutrient_lim_DIP}_{i,j} \cdot \text{light_lim}_{i,j}$$



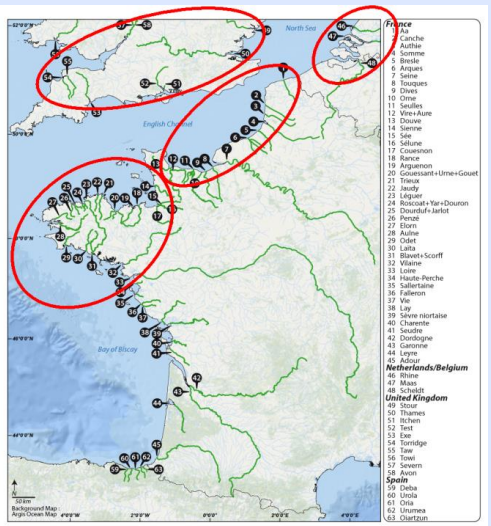
Relations obtenues entre P90 de chlorophylle satellitaire et :

en gris: NO₃ ou PO₄ corrigé de la limitation par la lumière

en noir: NO₃ ou PO₄ corrigé des limitations par la lumière et le rapport N/P des nutriments dissous

La réponse pour le descripteur « phyto estival de surface »

Approche statistique appliquée à 4 groupes de fleuves

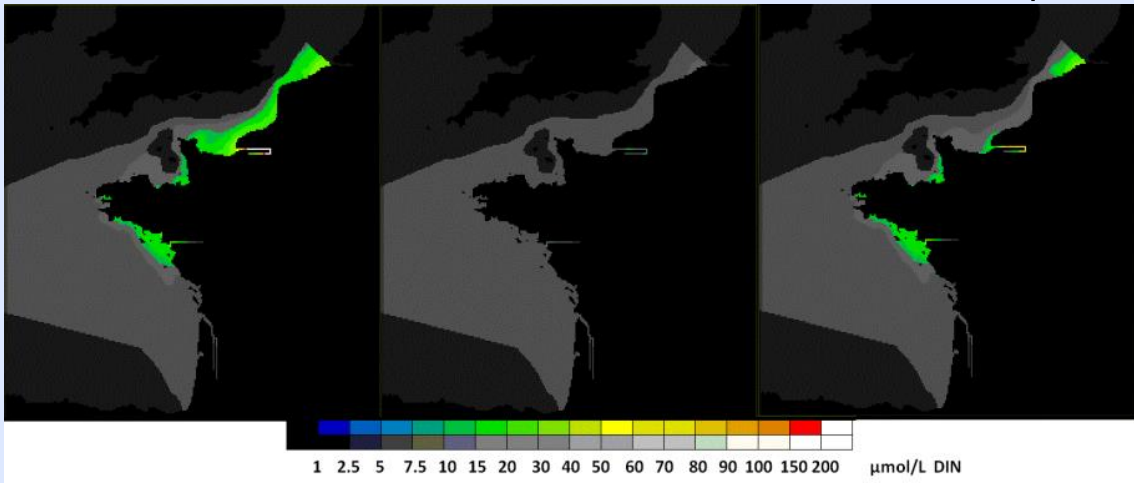


NITRATE

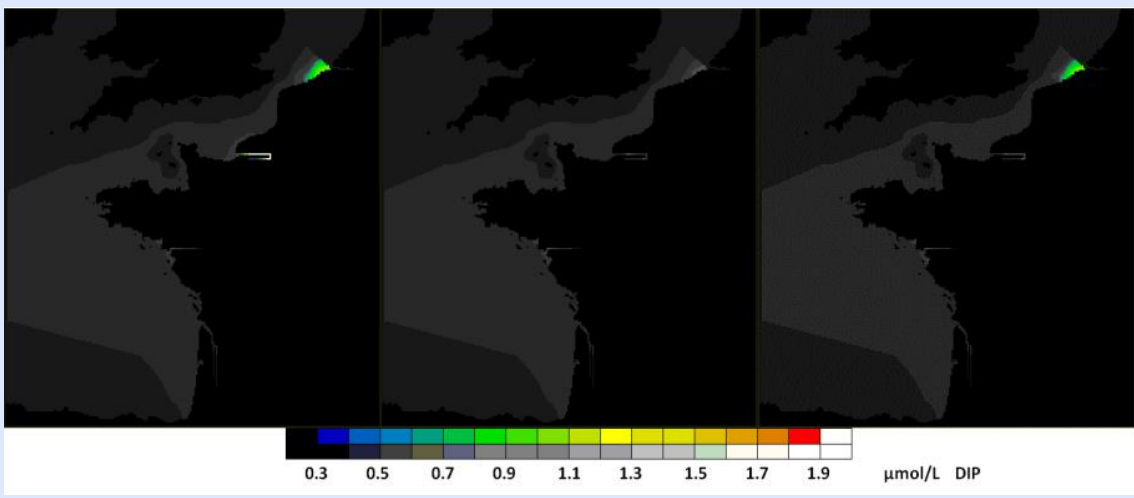
Situation actuelle

Après optimisation sur nutriment brut

Après optimisation sur nutriment biodisponible



PHOSPHATE

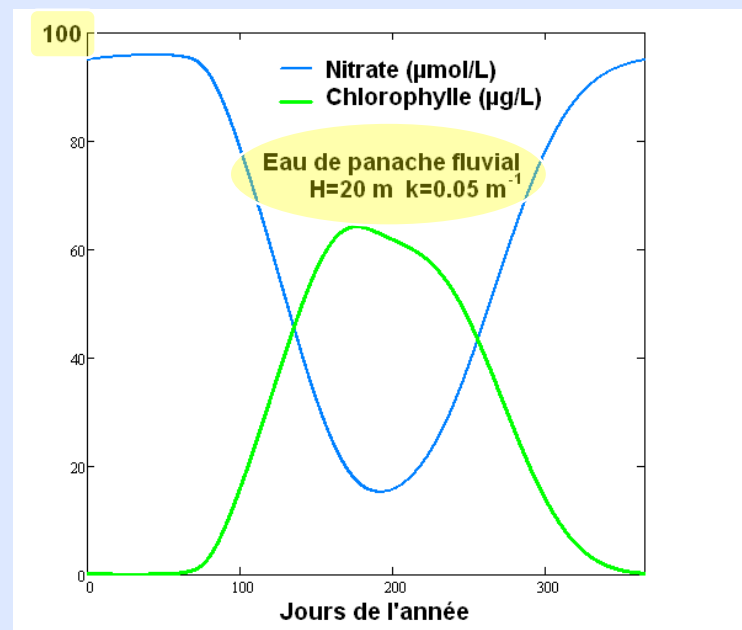
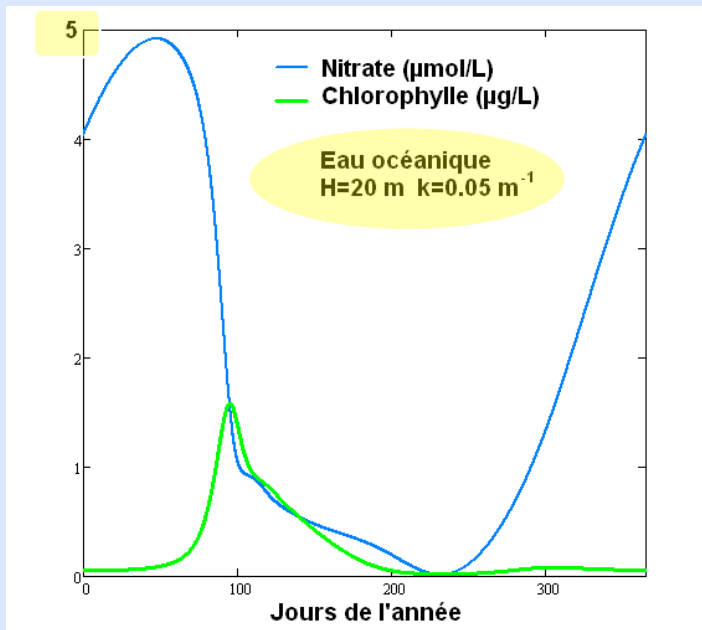


=> La prise en compte des facteurs naturels limitant la production primaire permet de relever les seuils de NO_3 et PO_4 fluviaux à recommander.

La réponse pour le descripteur « phyto estival de surface »

Approche déterministe : utilisation d'un modèle 0D pour construire $F_{H,k,T}([NO_3], [PO_4])$

Exemple de la réponse du modèle à 2 variables (NO_3 , chlorophylle) à 2 types d'environnement en nitrate



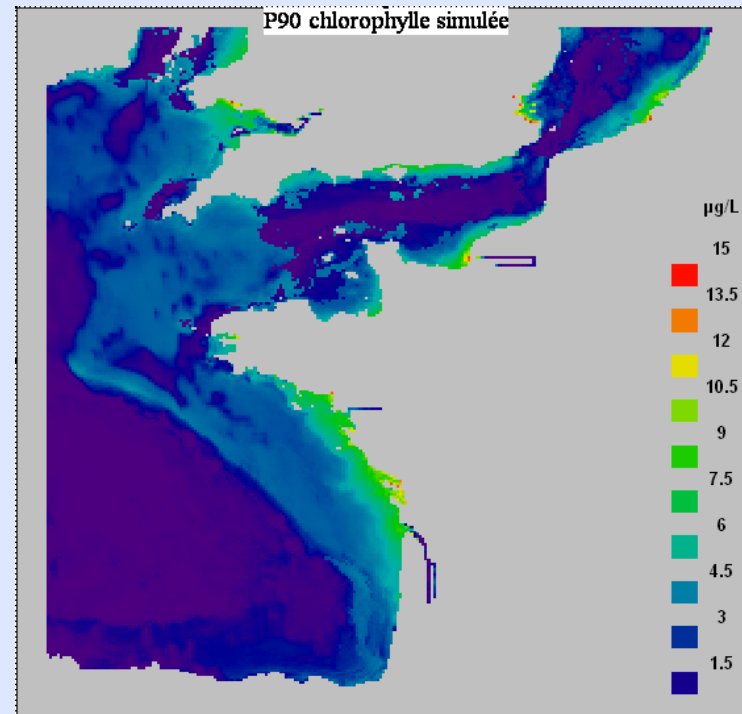
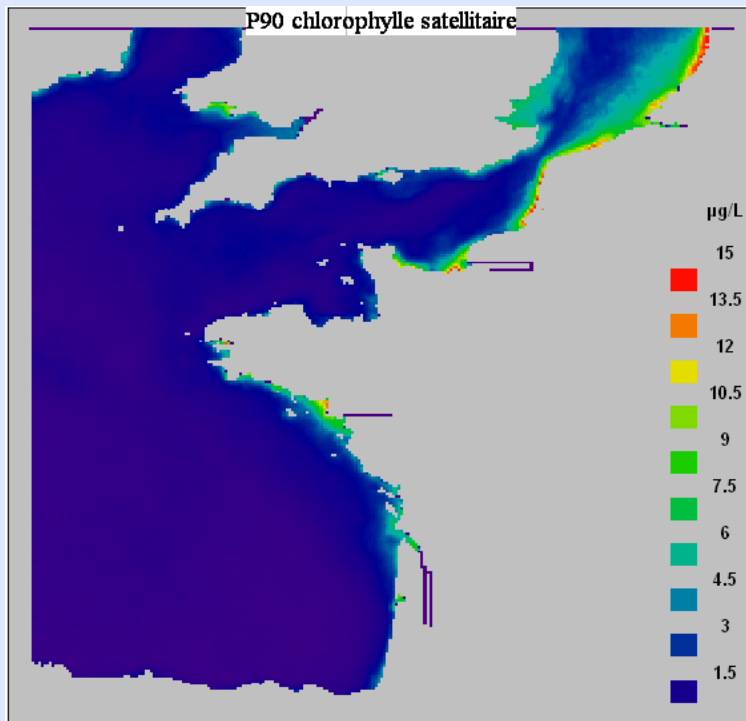
Formule empirique logistique déduite de simulations sous divers H, k et T:

$$[P90\text{ chloro}] = [NO_3] \cdot \frac{a + b \cdot (kH)}{1 + c \cdot \exp[\alpha \cdot (kH) - \beta \cdot T]}$$

La réponse pour le descripteur « phyto estival de surface » »

Approche déterministe : validation de la fonction $F_{H,K,T}([NO_3], [PO_4])$

EN COURS



Approche déterministe : introduction de la fonction $F_{H,K,T}([NO_3], [PO_4])$
dans le calcul des $([NO_3], [PO_4])$ fluviaux optimaux

A FAIRE

CONCLUSION

Un constat :

- ✓ **La gestion de l'eutrophisation marine ne s'appuie pas assez sur une théorie quantitative**
 - Il faut arriver à une cartographie du risque d'eutrophisation en fonction de ses principaux facteurs de contrôle (éclairage, confinement horizontal et vertical, teneurs en nitrate, phosphate, silicate...)
 - Il faut établir pour chaque descripteur de l'eutrophisation marine, des seuils objectifs de nuisance, les plus universels et transfrontières possible, ce qui permettra de remonter à des seuils de nutriments dans les fleuves
- ✓ **Le modèle ECO-MARS3D ne prend explicitement en compte ni la dénitrification, ni les stocks sédimentaires de N et P**

Des recommandations valant pour des zones cibles étendues de Manche-Atlantique :

- ✓ **Réduction de NO_3**
 - les grands fleuves (Garonne et Dordogne, Loire et Seine), à grandes « zones d'influence », requièrent un abattement élevé si on vise un seuil de BEE en NO_3 (>90%), plus faible si on vise un seuil de BEE en Chloro
 - les très petits fleuves côtiers qui causent des « marées vertes » doivent être ramenés à 10 mg/L, les autres peuvent s'accomoder d'un abattement très faible
- ✓ **Réduction de PO_4**
 - quel que soit le critère de BEE, la Seine requiert un abattement élevé (>60%), les autres grands fleuves un abattement de l'ordre de 10%
 - presque tous les autres fleuves côtiers ne nécessitent aucun abattement, sauf en Normandie, où certains ont des concentrations moyennes élevées en phosphate
- ✓ **Effets attendus sur le phytoplancton et l'oxygène**
 - faible baisse du P90 de chlorophylle dans les panaches, mais forte baisse des dinoflagellés
 - très faible amélioration des hypoxies de fond locales



Merci de votre attention