



RAPPORT FINAL PROJET LITEAU II

**Modélisation intégrée des transferts de nutriments
depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et
l'Escaut jusqu'en Manche-Mer du Nord**

Coordination :
Alain Lefebvre
Ifremer
Centre Manche Mer du Nord
Laboratoire Environnement
Ressources
150 quai Gambetta - BP 699
62321 Boulogne-sur-Mer Cédex

Date : Version 3 - 05/2008

N° de contrat : Convention de Recherche N°19-G/2003
(référence Accord N°CV 04000018)

Date du contrat : 04/1215210/MF

SYNTHESE

RAPPORT FINAL PROJET LITEAU II

Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche-Mer du Nord

Coordination

A. Lefebvre (Centre Ifremer Manche Mer du Nord)

Partenaires

Ifremer - Centre Manche Mer du Nord, Laboratoire Environnement et Ressources - 150, quai Gambetta, BP 699 - 62321 Boulogne-sur-Mer Cédex

Ifremer - Centre de Brest, Département DYNamique de l'Environnement COtier BP70 - 29280 Plouzané

ESA-ULB : Écologie des Systèmes Aquatiques, Université Libre de Bruxelles Campus de la Plaine, CP221, Boulevard du Triomphe - 1050 Bruxelles (Belgique)

UMR 7619 Sisyphe, CNRS-Université Pierre & Marie Curie, 4 place Jussieu -75005 Paris



UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES, UNIVERSITÉ D'EUROPE



Unité Mixte de Recherche 7619



Structure et fonctionnement
des systèmes hydrologiques continentaux

CONTEXTE GENERAL

Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?

Une gestion rationnelle et durable du littoral doit reconnaître ce milieu comme le dernier maillon d'une chaîne d'écosystèmes aquatiques qui se succèdent à travers tout le réseau de drainage de son bassin versant, depuis les ruisseaux de tête de bassin jusqu'aux zones estuariennes et côtières. Le milieu littoral est ainsi le réceptacle des flux de matière qui résultent de l'ouverture des cycles dans les systèmes terrestres du bassin aménagé par l'homme. Les flux qui parviennent au milieu marin dépendent en outre du fonctionnement des écosystèmes dulçaquicoles et estuariens, et des processus de transformation, de rétention et d'élimination qui s'y produisent. C'est donc une vision d'ensemble du fonctionnement de ce continuum d'écosystèmes qui doit être développée pour fonder l'aménagement durable du milieu littoral.

Des outils opérationnels couvrant l'ensemble de ce continuum manquent encore dans bien des cas, car le développement de la recherche en cette matière a trop souvent été entravé par les clivages qui ont longtemps existé entre la communauté scientifique des océanographes et celle des limnologues. Le continuum *Seine, Estuaire de Seine, Baie de Seine*, a été à cet égard un site pilote, très anthropisé, sur lequel a été testée, dans le cadre du programme LITEAU I, une approche novatrice et intégrée de la gestion des bassins versants, des milieux dulçaquicoles et des milieux littoraux.

En effet, en ce qui concerne les bassins versants, le *programme PIREN-Seine* du CNRS s'est attaché à développer une vision d'ensemble, formalisée sous forme de modèles mathématiques, des transferts et des transformations d'éléments biogènes et anthropogènes dans le réseau hydrographique d'un grand fleuve, la Seine, ses zones stagnantes annexes et ses aquifères, en cherchant à comprendre la manière dont le fonctionnement du système est modifié par l'activité humaine qu'il supporte. Les transferts de nutriments, tout particulièrement de l'azote, y ont été étudiés dans le but d'établir un modèle intégré de leur cycle depuis les sols du bassin versant jusqu'aux eaux souterraines et de surface. En raison de la très grande inertie de certains des réservoirs impliqués, cette étude prend nécessairement en compte les tendances évolutives du dernier demi-siècle. L'outil mathématique (Ruelland *et al.*, 2008) est maintenant bien au point, et peut être appliqué à d'autres bassins versants, pourvu que l'on dispose sur ceux-ci des données nécessaires.

En ce qui concerne le milieu marin côtier, le *chantier PNEC Baie de Seine*, terminé en 2002, a été l'occasion de quantifier et de modéliser l'effet des apports de nutriments terrigènes sur le fonctionnement des systèmes pélagique et benthique de la zone côtière réceptrice, la Baie de Seine. Cette dernière est régulièrement le siège d'eaux colorées causées par la prolifération de diatomées et de dinoflagellés, ainsi que de proliférations d'espèces phytoplanctoniques toxiques comme *Dinophysis*. La modélisation 3D de la Baie de Seine (ELISE/SiAM, Cugier, 1999, Cugier et Le Hir, 2002) a permis de reproduire les grands traits de la répartition spatio-temporelle des diatomées et des dinoflagellés et de relier l'abondance de ces derniers aux plus faibles rapports Si/N et Si/P dans les apports de la Seine au cours des années sèches.

Dans le cadre de LITEAU I, ces modèles du bassin versant et de la zone marine réceptacle ont été utilisés en parallèle pour explorer un certain nombre de scénarios d'apports de nutriments par la Seine. Les premiers, rétrospectifs, s'inscrivent dans la problématique de la recherche de conditions de référence de l'état de la Baie de Seine. Les seconds, prospectifs, visent à évaluer

ce que l'on peut attendre en termes de contrôle de l'eutrophisation côtière de la mise en œuvre des programmes de gestion des rejets d'eaux usées techniquement réalisables à moyen terme. Les résultats (Cugier *et al.*, 2003) montrent qu'au cours des périodes historiques, l'azote semble avoir été l'élément limitant principal de la croissance des algues au moment de leur maximum de biomasse, les apports de silice étant alors excédentaires par rapport à ceux des deux autres nutriments. Actuellement, l'accroissement des apports d'azote et de phosphore a fait de la silice l'élément limitant principal de la production de diatomées, ce qui favorise la croissance estivale des algues non siliceuses. La baisse tendancielle récente des apports ponctuels de phosphore, et la relative facilité technique des traitements de déphosphatation des effluents, font qu'une situation d'excédent de silice pourrait être rapidement restaurée en Baie de Seine, avec une limitation générale par le phosphore. Une telle situation serait caractérisée par des floraisons d'algues non siliceuses nettement moins importantes qu'actuellement, et probablement tout à fait supportables. On serait loin cependant de retrouver l'état 'historique' ou 'pristine' du système écologique de la Baie de Seine.

Il est souhaitable d'étendre aujourd'hui cette approche à l'ensemble de la bande côtière française de la Manche-est, puis belgo-néerlandaise de la Mer du Nord, zones largement influencées dans leur fonctionnement écologique par les apports de la Seine, de la Somme et de l'Escaut. Les bassins versants correspondants, de superficies respectives de l'ordre de 70 000, 7 000 et 20 000 km², concentrent en effet 30% de la population de la France, 40% de son activité industrielle et 40% de sa production agricole d'une part, 60% de la population de la Belgique, 65% de son activité industrielle et 50% de sa production agricole d'autre part. En Mer du Nord, l'eutrophisation de la bande côtière a stimulé la prolifération spécifique de colonies de *Phaeocystis*, responsable d'accumulations de mousse sur les côtes. La Belgique, très touchée par le phénomène, a développé depuis une vingtaine d'années plusieurs programmes d'étude et de modélisation de ce cas particulier d'eutrophisation, dont le dernier, *AMORE II*, a démarré en 2002. Des pourparlers ont eu lieu pour définir les modalités de collaboration du projet *AMORE* et du chantier *PNEC Manche-est* qui, dans le contexte biologique de la prolifération de *Phaeocystis* et afin de répondre aux attentes des instances nationales françaises et internationales, se propose de répondre à deux objectifs principaux : (i) Quels sont les causes naturelles et les synergies anthropogènes responsables de l'apparition des blooms de *Phaeocystis* en Manche orientale et en Mer du Nord ? et (ii) Quelles sont les conséquences des blooms de *Phaeocystis* sur l'écosystème marin et pour ses usagers, en Manche orientale et en Mer du Nord ?

De même que sur les bassins versants, l'outil mathématique permettant la simulation 3D des cycles de la matière et des nutriments en mer côtière (cf. figure 1) est aujourd'hui à un stade de maturité qui permet d'en envisager l'application systématique à de vastes zones marines et sous un forçage climatique et anthropique quelconque.

Sur la zone Manche-est/Mer du Nord méridionale, le couplage des connaissances acquises sur les milieux terrestre et marin permettrait aujourd'hui d'évaluer quantitativement

* la part respective de chaque fleuve dans l'eutrophisation d'une zone marine cumulant les apports de plusieurs sources ;

* le lien entre l'eutrophisation de la bande côtière et les orientations de l'agriculture, de l'aménagement des zones humides, la politique de traitement des eaux usées dans le bassin, ou tout simplement certains phénomènes sur lesquels l'homme est moins directement influent comme les variations interannuelles de pluviométrie ;

* l'impact sur le milieu marin des aménagements successifs qui ont modifié profondément le cadre et le fonctionnement des estuaires ;

* les temps de réponse du système global aux modifications de ses contraintes, compte tenu, notamment, des stocks accumulés dans les sédiments et les aquifères.

C'est ce que se propose de traiter le présent projet de recherche.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

L'objectif du projet consiste essentiellement à fournir des éléments d'appréciation quantitative des conséquences passées et futures des apports de nutriments par les fleuves du littoral franco-belge (Seine, Somme, Escaut) sur l'état d'eutrophisation de la Manche-Mer du Nord. Ce projet vient donc directement en appui à la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (directive 2000/60/CE), dans le cadre de l'axe 2.1 (Définition des états écologiques) de l'APR LITEAU 2. Il reprend et généralise à toute la Manche-est et le sud de la Mer du Nord les résultats d'un premier projet réalisé dans le cadre du Programme LITEAU 1 qui a permis de mettre au point la démarche sur le cas du bassin versant de la Seine et de son réceptacle marin immédiat : la Baie de Seine.

La méthode consistera à réaliser les simulations des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et du silicium sur les bassins versants de la Somme et de l'Escaut, ainsi qu'il a été déjà fait pour le réseau hydrographique de la Seine et à les valider sur les séries de mesures disponibles, notamment quant à la simulation réaliste de l'évolution passée des flux de nutriments à l'exutoire. Il s'agira également de fournir ces chroniques de flux simulées en entrée des modèles 3D de la Manche-Mer du Nord méridionale actuellement en cours de mise au point à l'Ifremer et à l'UGMM et à valider sur les années récentes les répartitions observées des nutriments et des blooms phytoplanctoniques marins. Finalement, l'ensemble des modèles des 3 bassins versants et de la Manche-Mer du Nord sera mis en œuvre pour tester divers scénarios d'évolution future et à fournir ainsi une aide à la décision en matière de gestion du milieu littoral et du bassin versant qui l'influence.

Les résultats attendus concernent essentiellement l'évaluation d'une situation dite « pristine » de la production phytoplanctonique en Manche-Mer du Nord, conformément à l'esprit de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau par rapport à laquelle il sera plus aisé de placer à la fois la situation eutrophisée actuelle et les effets attendus de politiques plausibles de réduction des apports de nutriments par les 3 fleuves étudiés. Les simulations permettront, en outre, de quantifier la part respective des 3 fleuves dans les flux inorganiques et organiques transmis à la partie nord de la Mer du Nord, contribuant à clarifier le rôle des apports franco-belges à l'eutrophisation de la Mer du Nord.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE

Les outils mis en œuvre

La méthode consiste à réaliser les simulations des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et de la silice sur les bassins versants de la Somme et de l'Escaut, ainsi qu'il a été déjà fait pour le réseau hydrographique de la Seine et à les valider sur les séries de mesures disponibles, notamment quant à la simulation réaliste de l'évolution passée des flux de nutriments à l'exutoire. Il s'agit également de fournir ces chroniques de flux simulées en entrée du modèle 3D de la Manche-Mer du Nord méridionale actuellement en cours de mise au point, et à valider sur les années récentes les répartitions observées des nutriments et des

blooms phytoplanctoniques marins. Finalement, l'ensemble des modèles des 3 bassins versants et de la Manche-Mer du Nord est mis en œuvre pour tester divers scénarios d'évolution future et à fournir ainsi une aide à la décision en matière de gestion du milieu littoral et du bassin versant qui l'influence.

La zone d'étude est constituée par la Manche et la partie sud de la Mer du Nord (Figure 1). Le rapport final présente les principales caractéristiques de cet écosystème et les baies de Seine, de Somme et de l'Escaut font l'objet d'une description plus détaillée.

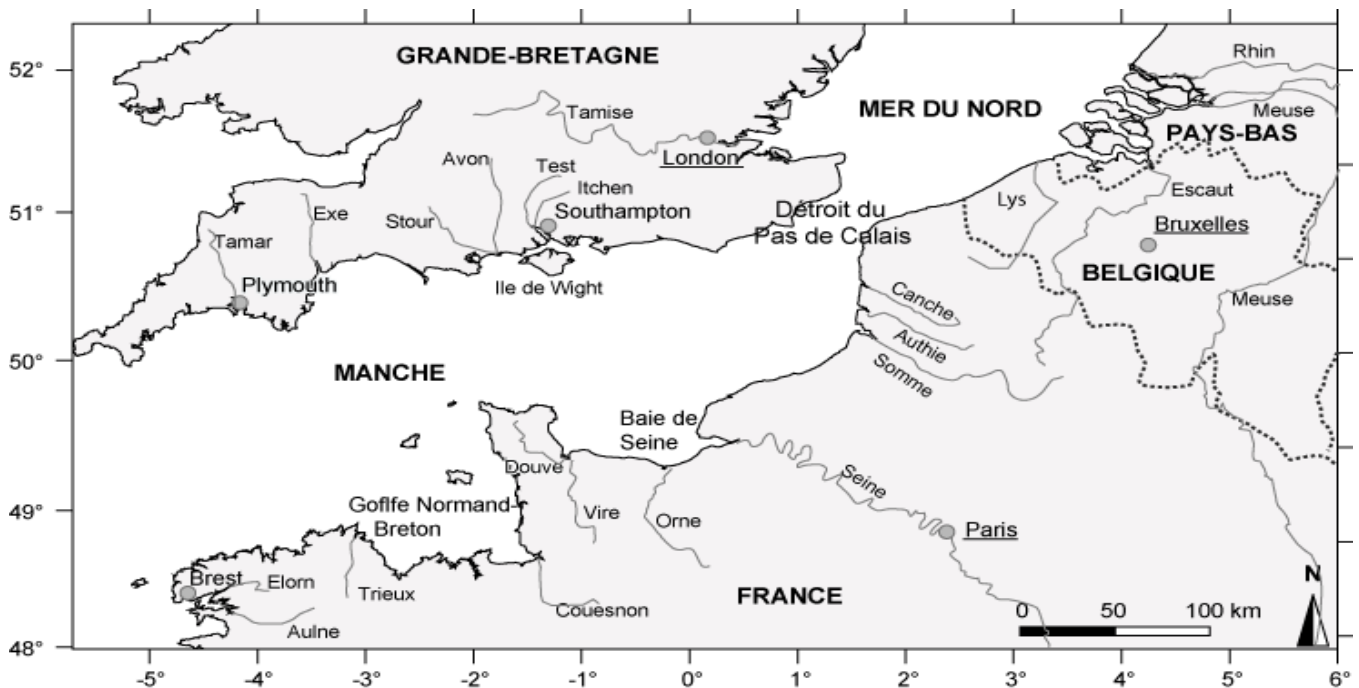


Figure 1. Emprise de la zone d'étude

Plusieurs outils de modélisation ont été mis en œuvre afin d'obtenir un maximum d'informations lié à la différence de leur structure et de leurs capacités de réponse. Une des difficultés majeures a été la constitution d'une base de données commune (apports des rivières notamment) avec des informations issues de différentes sources plus ou moins facilement accessibles (difficultés plus importantes pour la partie belge dont les données sont gérées par différentes entités).

Le modèle multi-boîtes 0D-MIRO

Le modèle biogéochimique MIRO décrit les efflorescences de diatomées et de *Phaeocystis* et les cycles associés de carbone, d'azote, de phosphore et de silice dans la Manche orientale et la Baie Sud de la mer du Nord limitée à la frontière Nord de la Zone Économique Exclusive belge (Figure 2). La structure du modèle, la paramétrisation et sa validation selon un forçage climatologique et d'apports de rivières correspondants aux années 1989-1999 sont décrits dans Lancelot *et al.* (2005).

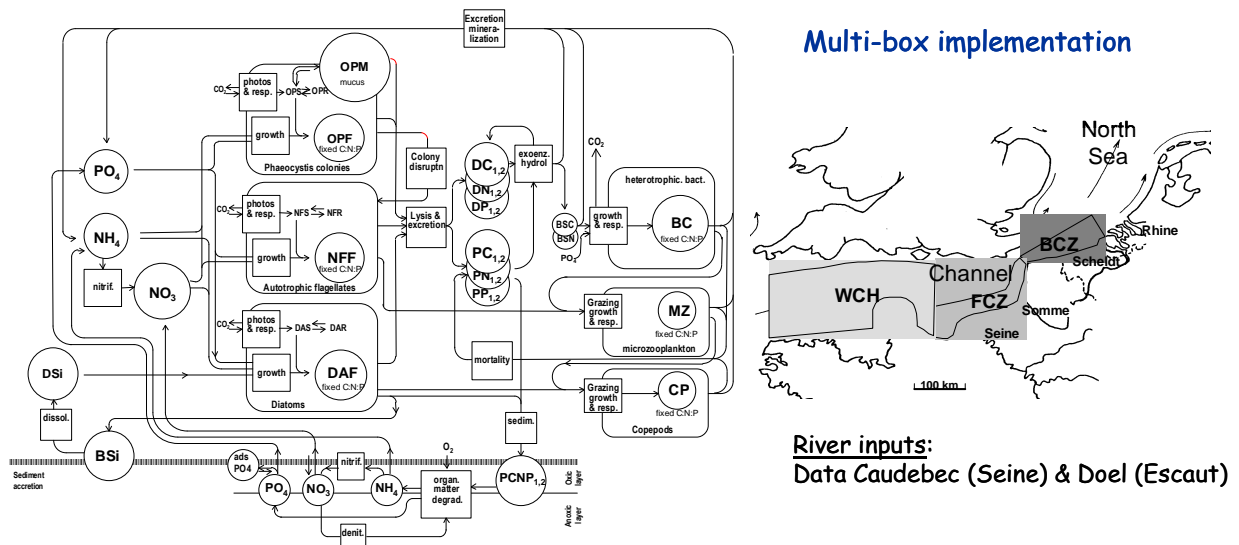


Figure 2. Structure du modèle MIRO : Nutriments : Ammonium (NH_4), nitrate (NO_3), phosphate (PO_4), silice dissoute (DSi) et silice biogénique (BSi) ; Diatomées (DA) et composés cellulaires de réserve (DAR), fonctionnels (DAF) et monomériques (DAS) ; nanophytoflagellés (NF) et composés cellulaires de réserve (NFR), fonctionnels (NFF) et monomériques (NFS) ; cellules coloniales de *Phaeocystis* (OPC) et composés cellulaires de réserve (OPR), fonctionnels (OPF) et monomériques (OPS) ; Matrice coloniale de *Phaeocystis* (OPM) ; bactéries (BC) ; microzooplancton (MC), copépodes (CP) ; substrats bactériens carbonés (BSC) et azotés (BSN) ; matière organique particulaire de biodégradabilité 1 (rapide) et 2 (lente) carbonée (PC1,2), azotée (PN1,2) et phosphorée (PP1,2) ; matière organique dissoute de biodégradabilité 1 (rapide) et 2 (lente) carbonée (DC1,2), azotée (DN1,2) et phosphorée (DP1,2) et son implémentation multi-boîtes : conditions limites océaniques (WCH) ; zones côtières française (FCZ) et belge (BCZ)

Le modèle ECO-MARS3D

Le modèle tridimensionnel de l'écosystème ECO-MARS3D « Manche et Mer du Nord méridionale » (Tableau 1) résulte du couplage entre un modèle hydrodynamique 3D (MARS3D de l'Ifremer) et un modèle biogéochimique ; les équations d'échanges de flux de matières entre le sédiment et la colonne d'eau sont décrites dans le modèle hydrosédimentaire SiAM3D de l'Ifremer. Il prédit les champs de courant, de salinité et de température dans tout le domaine. Le maillage est régulier et les mailles sont carrées. Pour l'étude de la Manche, la résolution horizontale a été fixée à 4 km afin de représenter les différents processus physiques à mésoéchelle. Pour ce qui est du maillage vertical, le nombre de couches est constant sur l'ensemble du domaine. Les couches de surface sont plus fines afin de représenter au mieux les gradients de densité halins et thermiques. Les couches de fond sont également assez fines afin de résoudre correctement les échanges de matière à l'interface eau-sédiment.

Le modèle biogéochimique décrit les cycles des éléments qui limitent la croissance phytoplanctonique : l'azote (N), le phosphore (P) et le silicium (Si). Le schéma conceptuel des transferts de matière entre les différentes variables d'état est représenté sur la figure 3.

Le phytoplancton est représenté par plusieurs groupes fonctionnels et par deux sous-modèles d'espèces. Tout d'abord le phytoplancton est réparti entre organismes siliceux devant assimiler le silicate d'une part (ce sont les diatomées : *Diat*) et organismes non-siliceux

d'autre part. Parmi les organismes non-siliceux, les dinoflagellés (*Dino*) et le nanophytoplancton (*Nano*) se distinguent par la taille des cellules et leurs cinétiques de croissance et de mortalité. Deux modèles d'espèces ont été rajoutés à ce modèle général car elles peuvent dominer transitoirement la communauté phytoplanctonique : l'espèce ichthyotoxique *Karenia mikimotoi* et l'espèce nuisible *Phaeocystis globosa*.

La biomasse de phytoplancton est contrôlée par la disponibilité en nutriments, en lumière, ainsi que par la température. Le processus de mortalité ne suffit pas à contraindre la population phytoplanctonique ; ainsi deux classes de zooplancton de tailles différentes (mésozooplancton : *Mésoz* et microzooplancton : *Microz*) consomment le phytoplancton et les matières détritiques.

Les compartiments détritiques (*Ndet*, *Sidet*. et *Pdet*.) sont alimentés par les organismes morts et les pelotes fécales du zooplancton. Ces matières détritiques, ainsi que les diatomées sédimentent dans la colonne d'eau et rejoignent le sédiment. Elles sont reminéralisées directement en nutriments par les bactéries. La boucle bactérienne n'est pas explicitement décrite dans ce modèle ; seule son action est paramétrisée.

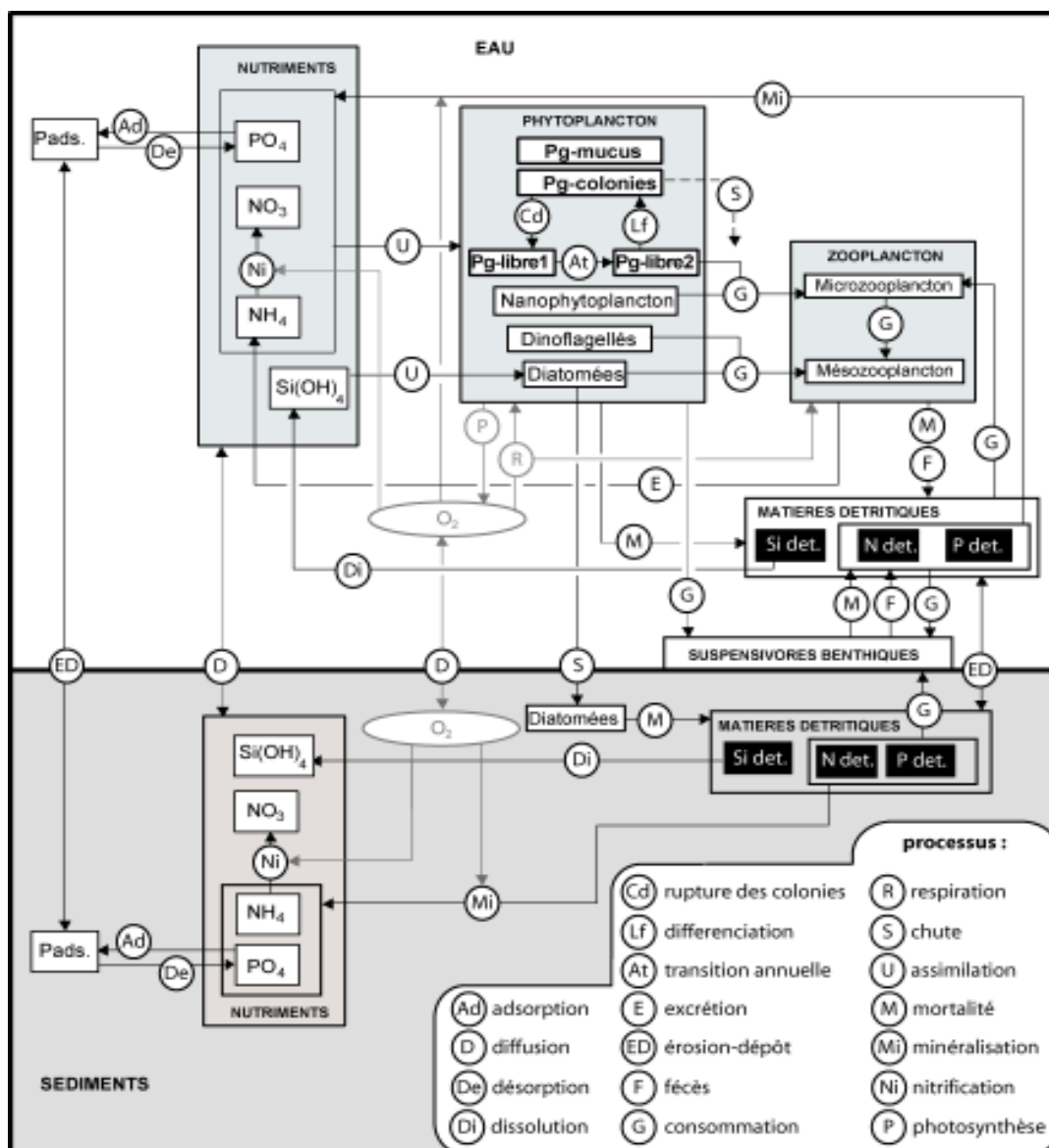


Figure 3. Schéma conceptuel des processus biogéochimiques du modèle ECO-MARS3D

Le modèle MIRO&CO-3D

Le modèle hydrodynamique 3D décrit dans Lacroix *et al.* (2004) et basé sur le modèle COHERENS (Luyten *et al.*, 1999) a été couplé avec le modèle biogéochimique MIRO (Lancelot *et al.*, 2005) afin de simuler la dynamique de l'écosystème des eaux belges et adjacentes.

Le modèle hydrodynamique 3D a été appliqué à la Manche et à la baie sud de la Mer du Nord entre 48.5°N et 52.5°N en utilisant une grille de 5' (longitude) par 2.5' (latitude). Outre les courants, la température et la salinité décrits par le modèle, des traceurs sont utilisés pour caractériser la signature des masses d'eau en termes d'apports d'eau atlantique et des différentes rivières. Toutes les fonctions forçantes, les conditions aux frontières et initiales sont définies dans Lacroix *et al.* (2004).

Le modèle MIRO (Figure 2 – Tableau 1) décrit l'évolution dans le temps de 32 variables d'état incluant 3 types de phytoplancton (chacun avec 3 compartiments: fonctionnel, substrat et réserves) : les diatomées, les flagellés autotrophes et les colonies de *Phaeocystis*, 2 espèces de zooplancton : le microzooplancton et les copépodes, les bactéries hétérotrophes, les formes dissoutes et particulaires du carbone, de l'azote, du phosphore et de la silice ainsi que 4 nutriments : le nitrate, l'ammonium, le phosphate et le silicate. Les équations gouvernant leur évolution et les interactions sont définies en détail dans Lancelot *et al.* (2005).

Tableau 1. Synthèse des caractéristiques principales des modèles ECO-MARS3D et MIRO&CO-3D

	modèle ECO-MARS3D	modèle MIRO&CO-3D
EMPRISE et MAILLAGE		
nombre de couches sur la verticale	12	5
taille des mailles dans le plan horizontal	Maille carré : côté 4 km	En longitude : 5,6 km En latitude : 4,6 km
BIOGEOCHIMIE		
classes phytoplanctoniques	diatomées dinoflagellés nanoflagellés Karenia mikimotoi cellules libres de Phaeocystis colonies de Phaeocystis	diatomées cellules libres de Phaeocystis colonies de Phaeocystis
classes zooplanctoniques	microzooplancton mésozooplancton	microzooplancton mésozooplancton
nombre de compartiments par classe algale	1	3 : monomères substances de réserves métabolites structurels et fonctionnels
éléments décrits	N, P, Si	N, P, Si, C

BIOGEOCHIMIE (Suite)		
modélisation du compartiment bactérien	son action est paramétrisée	modélisation explicite
FORCAGES		
météorologie : vent	modèle ARPEGE (METEO-FRANCE)	modèle UKMO maillage variable
température de l'eau en surface	modèle thermique de MARS 3D	imposée à partir de données de SST hebdomadaires (BSH) maillage 20 km*20km
limite océanique ouest	valeurs imposées distinction surface/fond	gradient nul pour le plancton valeurs imposées pour les sels nutritifs
limite océanique nord	valeurs imposées 4 zones (CIEM)	valeurs imposées 3 zones (CIEM)
irradiance à l'interface air-mer	données METEOSAT/SAF fréquence : 1 par heure	PAR estimé à partir de la GSR mesurée à Ostende (données ULB)
coefficient d'extinction	Partie non chlorophyllienne : côte : SiAM3D (couplage) large : composites mensuels de la MES minérale SeaWIFS (algorithme F. Gohin)	Soit fonction de la concentration en chlorophylle modélisée soit fonction de la concentration en MES estimée à partir des images SeaWIFS : 1/saison (climatologie 1997-2002)

Le modèle SENEQUE/RIVERSTRAHLER

Le modèle RIVERSTRAHLER (Billen *et al.*, 1994 ; Garnier *et al.*, 1995, Garnier *et al.*, 2002) permet de calculer la qualité de l'eau (O₂, MES, matière organique, phytoplancton) et le bilan des transferts de nutriments (N, P, Si) dans le réseau hydrographique d'un grand fleuve, à partir des contraintes climatiques (pluviométrie, évapotranspiration) et liées à l'activité humaine (usage du sol et pratiques agricoles, rejets d'eaux usées, régulation hydraulique) (Figure 4).

Le modèle résulte du couplage de 2 modules :

Hydrostrahler calcule les débits spécifiques à partir des données climatiques. Dans les bassins amont, ces débits sont répartis dans les tributaires de chaque ordre hydrologique selon un schéma idéalisé de confluence de tributaires d'ordre croissant aux caractéristiques morphologiques moyennes. Dans les axes fluviaux, une description plus précise, au pas kilométrique est adoptée. La présence d'ouvrages de régulation (barrages-réservoirs) est prise en compte.

Le module *Rive* décrit la cinétique des processus biogéochimiques, postulée identique tout au long du continuum aquatique, et telle qu'elle résulte d'expérimentations de laboratoire.

SENEQUE (Ruelland *et al.*, 2007) est le logiciel résultant de l'incorporation de Riverstrahler dans une interface SIG conviviale, permettant une meilleure résolution et une plus grande souplesse dans la représentation du réseau hydrographique.

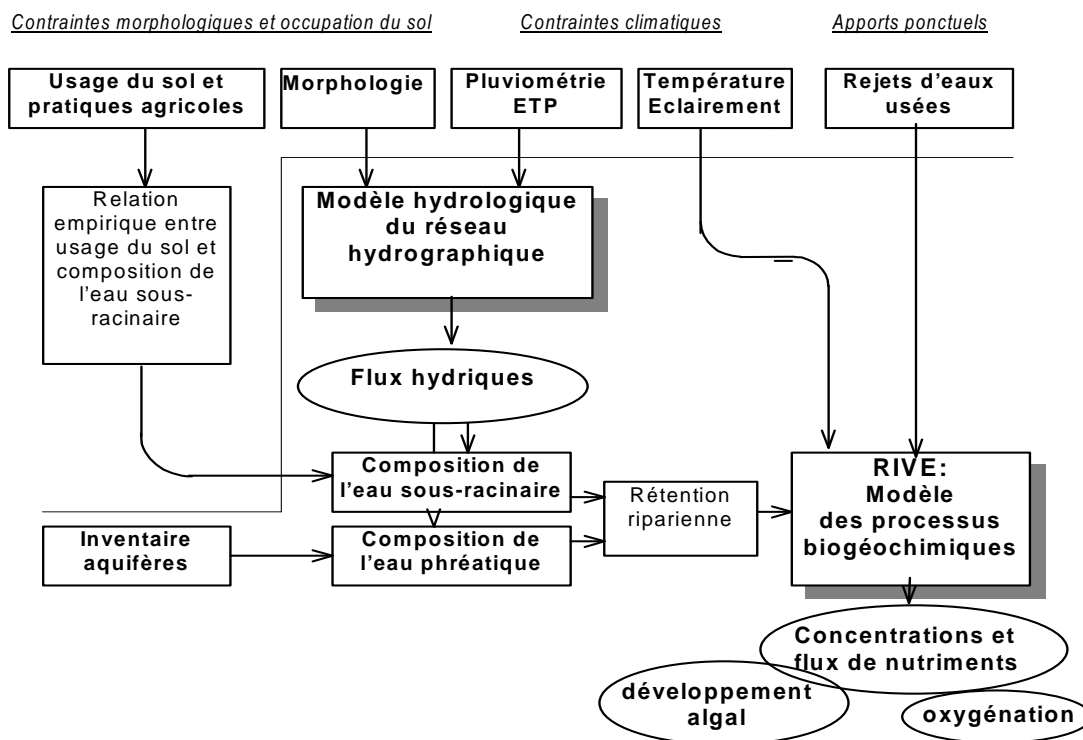


Figure 4. Représentation schématique du modèle Riverstrahler du réseau hydrographique des grands fleuves

RESULTATS OBTENUS

Les résultats concernent essentiellement l'évaluation d'une situation dite « pristine » de la production phytoplanctonique en Manche-Mer du Nord, conformément à l'esprit de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, par rapport à laquelle il sera plus aisé de placer à la fois la situation eutrophisée actuelle et les effets attendus de politiques plausibles de réduction des apports de nutriments par les 3 fleuves étudiés. Les simulations permettent en outre de quantifier la part respective des 3 fleuves dans les flux inorganiques et organiques transmis à la partie nord de la Mer du Nord, contribuant à clarifier le rôle des apports franco-belges à l'eutrophisation de la Mer du Nord.

La modélisation des bassins versants est basée sur la reconstitution de périodes clés pour le fonctionnement de ces écosystèmes (Figure 5) :

- une situation « pristine » (hors impact anthropique) caractérisée par une couverture végétale climacique et l'absence d'activités et d'aménagements humains,
- un état rural traditionnel (en gros jusqu'au milieu du XX^{ième} siècle),
- une période contemporaine avec une démographie importante, une urbanisation, un essor industriel et l'avènement de l'agriculture moderne,
- une projection à l'horizon 2015 avec réduction des apports de 90 % des matières organiques, de 90 % pour le phosphore et de 70 % pour l'azote.

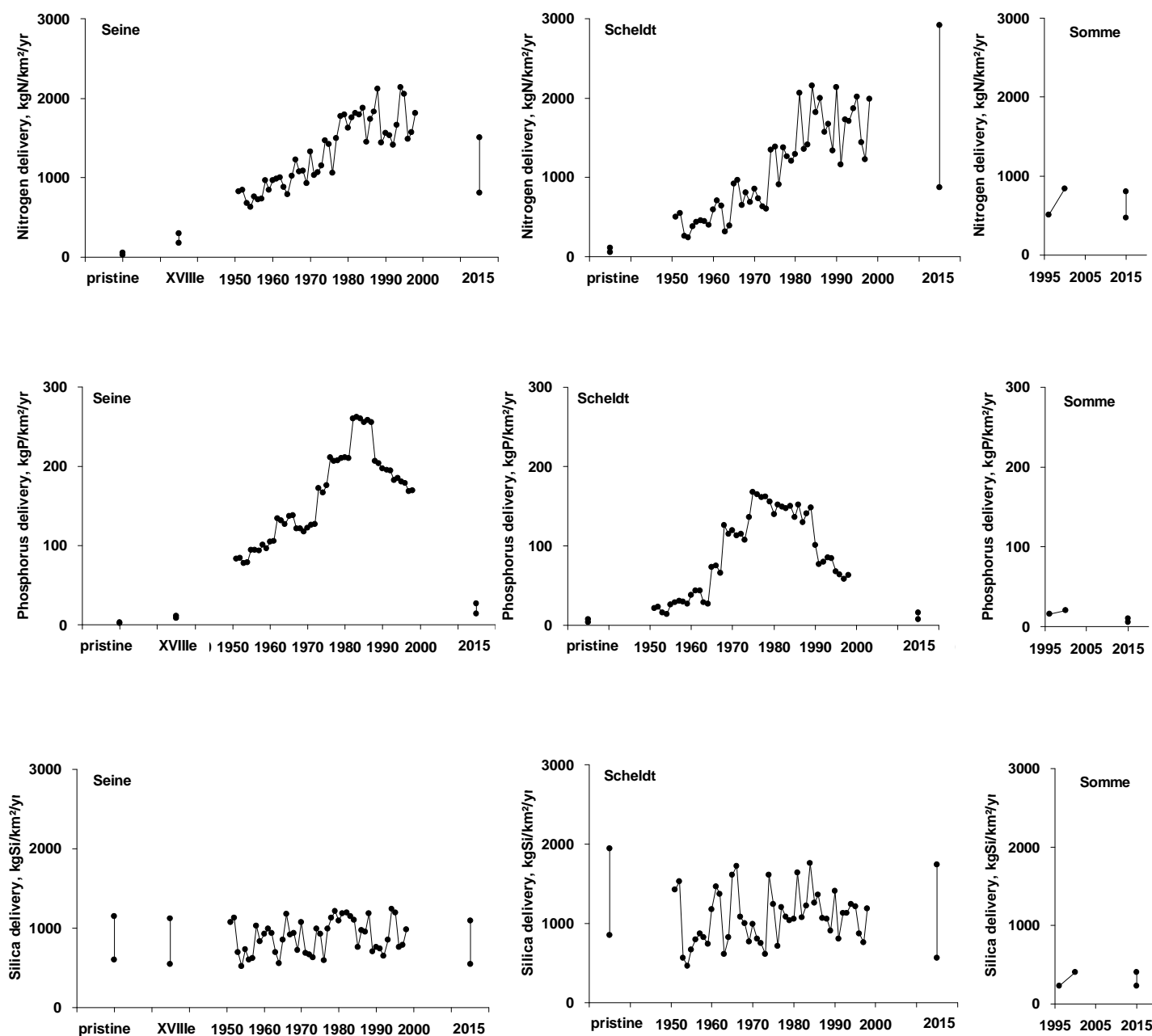


Figure 5. Flux annuels d'azote, de phosphore et de silice apportés par la Seine, l'Escaut et la Somme (simulations en conditions hydrologiques réelles)

La reconstitution des flux apportés au cours des cinquante dernières années révèle, pour la Seine et l'Escaut, que les rapports molaires N : P de ces flux ont diminué au cours de la seconde moitié du XX^{ième} siècle, conduisant à une limitation de la croissance algale par l'azote, alors que ces rapports augmentent dans les années 1980, provoquant une limitation par le phosphore. Pour la Somme, il ne semble pas y avoir eu de carence relative en azote par rapport au phosphore. Un déficit en silice par rapport à l'azote et au phosphore est observé en 1950 pour l'Escaut et un peu avant pour la Seine. Récemment, la diminution rapide du flux de phosphore a pour conséquence une augmentation du rapport Si : P.

En ce qui concerne les apports diffus, les temps de réaction des hydrosystèmes (en particulier les grands aquifères) sont trop longs pour que des mesures, si énergiques soient-elles, puissent aboutir à l'échéance de 10 ans à une diminution significative du niveau de contamination nitriques des eaux des sources souterraines. Nous pensons donc que l'hypothèse de la constance de ces concentrations à l'horizon 2015 est une hypothèse optimiste.

La reconstitution des tendances anthropiques à hydrologie constante révèle, qu'aux processus de rétention près, les apports de nutriments à la mer montrent une évolution semblable à celle des apports diffus et ponctuels des bassins versants. Dans la Seine, le rapport N : P diminue régulièrement jusqu'en 1990 : le début du XX^{ième} siècle correspond à une phase de transition avec passage d'une limitation de la croissance algale par le phosphore à une limitation par l'azote. Depuis 1990, la situation s'inverse, la silice excédentaire jusqu'à la fin du XIX^{ième} siècle, devient déficitaire ensuite. La situation amorce une inversion dans les années récentes.

L'analyse des simulations 0D portant sur les rivières ou l'écosystème marin et ciblée sur la zone belge permet de mettre en évidence trois grandes périodes :

- de l'état pristine à 1965 : période précédant la forte augmentation des apports de phosphore et d'azote par les rivières avec limitation potentielle de la croissance phytoplanctonique par le phosphore et l'azote par rapport à la silice
- de 1970 à 1995 : période d'enrichissement en phosphore et qualité des apports de nutriments proche des besoins du phytoplancton et profitant principalement aux diatomées et aux colonies de *Phaeocystis*,
- de 1990 à 2015 : période de moindre enrichissement en phosphore avec des apports potentiellement limitants en phosphore pour la croissance phytoplanctonique profitant principalement aux diatomées d'été et avec un effet moindre sur *Phaeocystis*,
- 2015 : sera caractérisé par une réduction plus importante du phosphore par rapport à l'azote, pénalisant davantage les efflorescences de diatomées que celles de *Phaeocystis*. Alors que le maximum de diatomées retournerait à un niveau comparable à celui des conditions naturelles, celui des *Phaeocystis* serait multiplié par 5.

Par rapport à l'état pristine, la concentration hivernale de nutriments en zone côtière belge à été multipliée par 2 en 1950, par 4 en 1985 et sera multipliée par 6 en 2015. Par ailleurs, alors que la concentration en phosphate a considérablement augmenté pour atteindre son maximum en 1985 (x 3,5 par rapport à l'état pristine), elle a été divisée par 2 depuis et en 15 ans. Plus généralement, l'étude de l'évolution des rapports stœchiométriques N : Si : P de l'enrichissement en nutriments suggère d'importantes modifications de la qualité de l'environnement nutritif disponible pour le phytoplancton côtier d'ici à 2015, l'excès d'azote sera exacerbé tandis que le phosphore et la silice sont proches des besoins des diatomées.

L'utilisation des modèles 3D permet de conclure qu'une réduction des apports de nutriments par la Manche ouest a un impact significatif sur les nutriments de surface et principalement à l'embouchure des rivières. Une réduction des apports par la Seine aurait l'impact le plus important sur la plus grande partie de la zone, à l'exception des zones côtières belges et hollandaises. Pour les eaux belges, il est à noter que dans la zone côtière, la plus sujette aux problèmes d'eutrophisation, c'est l'Escaut qui a l'influence la plus importante.

Le modèle MIRO&CO-3D montre qu'une réduction de 50 % de l'azote total entraîne une diminution significative de la concentration de *Phaeocystis* et une augmentation de celle des diatomées (printemps, été) en raison d'une disponibilité plus grande en phosphate qui résulte de la diminution de la floraison de *Phaeocystis*.

Une réduction de 50 % des apports en phosphore total ne génère qu'une très faible augmentation de la concentration de *Phaeocystis* en raison de la plus grande disponibilité en

azote inorganique dissous dû à la diminution des diatomées. Cette augmentation est cependant limitée par le phosphore. Une réduction conjointe de 50 % des apports d'azote et de phosphore provoque une diminution générale des nutriments ainsi que du phytoplancton à l'exception des diatomées de printemps au large et des diatomées d'été à la côte. En général, l'impact d'une réduction de nutriments par les rivières est plus prononcé à la côte qu'au large excepté pour *Phaeocystis*.

Le modèle ECO-MARS3D estime à 38 % le flux d'azote issu des fleuves français et transitant par le détroit du Pas-de-Calais. La part d'origine atlantique est donc largement majoritaire dans le flux d'azote entrant en mer du Nord par la limite sud. Dans la zone côtière où la concentration maximale simulée en *Phaeocystis* est supérieure à 10^6 cellules par litre, l'influence des apports des fleuves français est inférieure à 20 % (Figure 6).

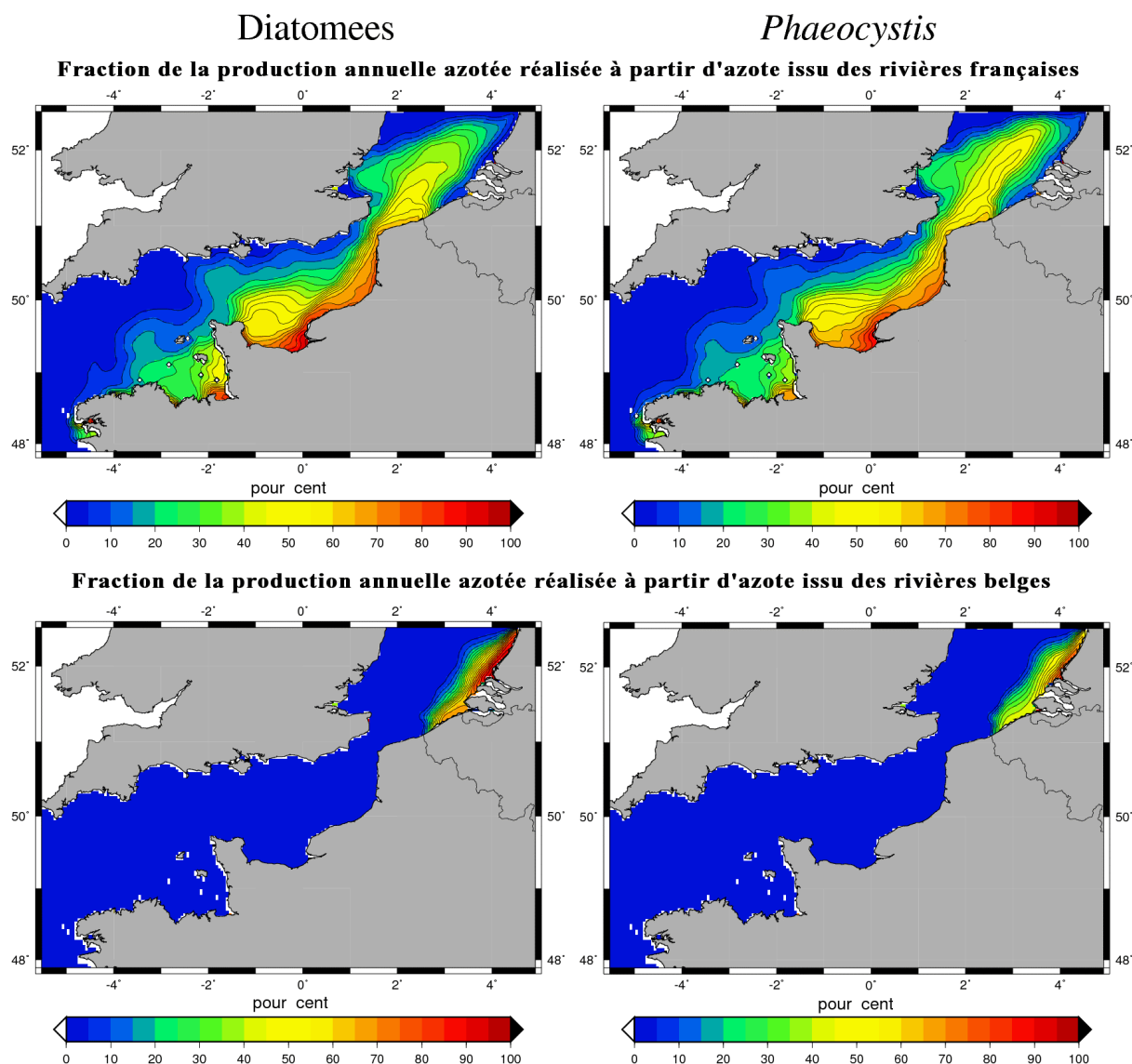


Figure 6. Proportions d'azote issu des rivières françaises (respectivement : issu des rivières belges) incorporé dans la biomasse produite annuellement par les diatomées ou par *Phaeocystis*.

Le nitrate est en moyenne à 22 % d'origine française dans la « boîte » du modèle représentant la zone de compétence belge. En moyenne sur l'année, l'influence des fleuves français est

supérieure à celle des fleuves belgo-néerlandais dans cette boîte. Cependant, la production de colonies de *Phaeocystis* dans la zone côtière belge est majoritairement liée à l'influence des apports de la Lys, de l'Escaut, de la Meuse et du Rhin, contrairement à ce que les résultats pour le nitrate laissent penser. Ceci s'explique par le fait qu'au moment du bloom de *Phaeocystis*, les panaches des fleuves belgo-néerlandais ont leur extension maximale et influent donc de manière prépondérante sur la production phytoplanctonique printanière locale.

La modélisation écologique a également permis de formuler et/ou de tester des indicateurs de qualité des masses d'eau comme ils peuvent être définis dans la Directive Cadre sur l'Eau et la convention OSPAR.

Le principe d'une classification de la qualité des masses d'eau repose sur l'évaluation d'un niveau de qualité grâce à des indicateurs et par référence à une situation initiale la plus proche possible de l'état naturel du système. Ceci permet de définir des objectifs de qualité qui seront intégrés dans des plans de gestion. L'utilisation de la modélisation permet de recréer des situations passées et permet donc de définir les états naturels ou permet d'envisager la situation actuelle comme le résultat des derniers plans de gestion mis en oeuvre. Elle rend possible la création de scénarios prospectifs afin de tester les politiques de gestion et d'aménagement des écosystèmes à l'horizon d'années définies par les directives, les conventions,...

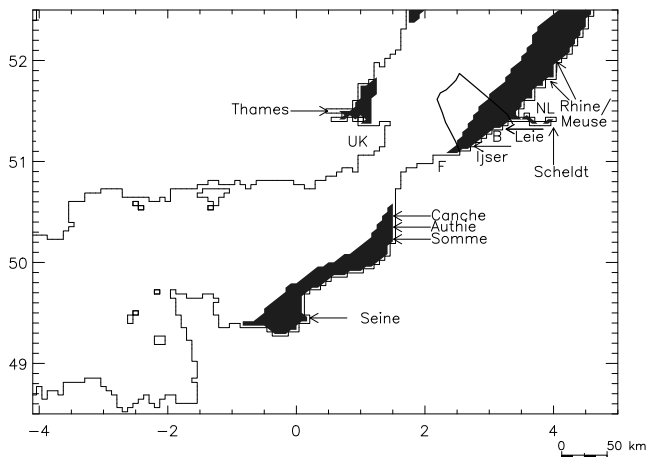
L'approche de modélisation du fonctionnement des bassins versants a permis le développement d'un indice de risque d'eutrophisation en zone côtière (ICEP : Indicator of Coastal Eutrophication Potential ; Billen & Garnier, 2007) basé sur les valeurs de flux de nutriments (N, P, Si) d'origine fluviale pour évaluer le risque de proliférations estivales d'algues non siliceuses (valeur < 0 : absence de risque).

Les résultats mettent en évidence pour la Seine un potentiel nul jusqu'à la moitié du XVIII^{ième} siècle qui devient modéré puis sévère dans les années 50 et qui diminue récemment, si bien qu'il sera plutôt modéré à l'horizon 2015. Le potentiel est significatif pour l'Escaut à partir des années 60 mais les valeurs devraient être inférieures à zéro à l'horizon 2015. Le potentiel de la Somme est très modéré en 2000 et diminue avec le scénario prospectif 2015.

Les modèles d'écosystème marin ont permis de vérifier le statut des masses d'eau au regard de l'eutrophisation tels que défini par la convention OSPAR dans sa stratégie de lutte contre l'eutrophisation (Procédure Commune notamment). Le modèle MIRO&CO-3D permet de confirmer le statut de zone à problème au regard de l'eutrophisation de la zone côtière belge. L'application des scénarios de réduction, définis lors de la seconde conférence internationale de la mer du Nord en 1987, révèle qu'une réduction de 50 % de N et de P ne semble pas suffire à faire disparaître les problèmes d'eutrophisation. Une réduction de 90 % des apports en N et en P des rivières serait nécessaire (Figure 7). Les résultats du modèle ECO-MARS3D sont cohérents avec les observations d'efflorescences phytoplanctoniques importantes en baie de Seine et en baie de Somme. Cependant, seuls les résultats pour le panache de la Seine coïncident avec la classification OSPAR en zone à problème, alors que les côtes du nord de la France et de la Belgique, classées en zone à problème, apparaissent comme zones sans problème selon le modèle. Pour le panache de la Seine, une réduction de 90 % de l'apport d'N serait nécessaire pour obtenir une valeur inférieure au seuil d'évaluation OSPAR, alors que les paramètres reflètent de l'effet direct de l'eutrophisation répondent déjà pour une réduction de 50 %.

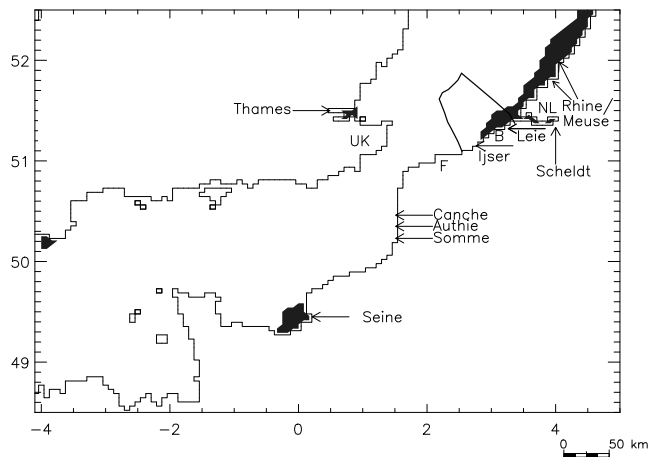
Globalement, les deux modèles montrent que l'isoline 1 % d'eau venant de la Seine atteint bien la partie offshore de la zone maritime belge, mais non la bande côtière belge dominée par les panaches de l'Escaut, du Rhin et de la Meuse. En Manche, les deux modèles pointent la baie de Seine en ce qui concerne le dépassement du seuil de concentration en chlorophylle *a*.

A



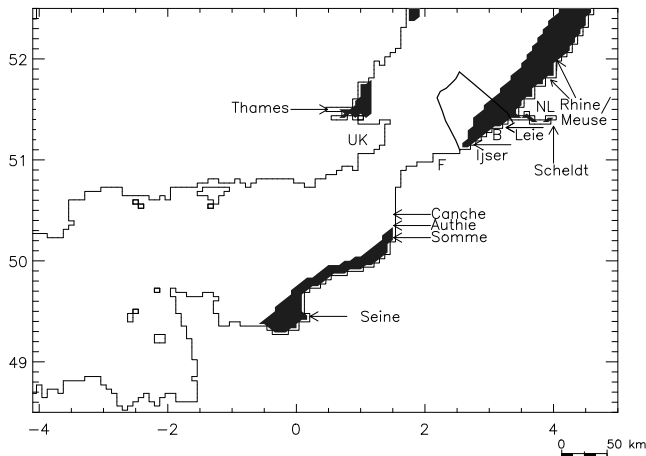
Black: winter DIN > 15 mmolN/m³

D



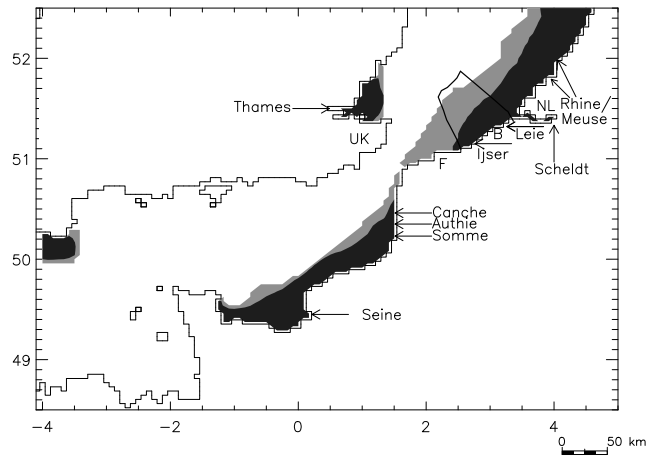
Black: Chlorophyll Max > 15 mgChl/m³

B



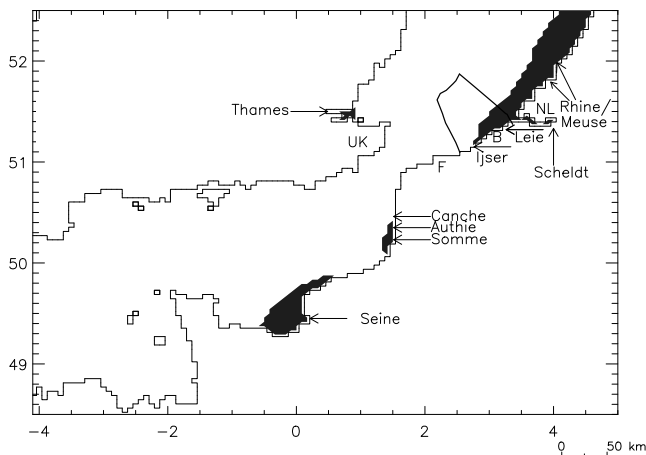
Black: winter DIP > 0.8 mmolP/m³

E



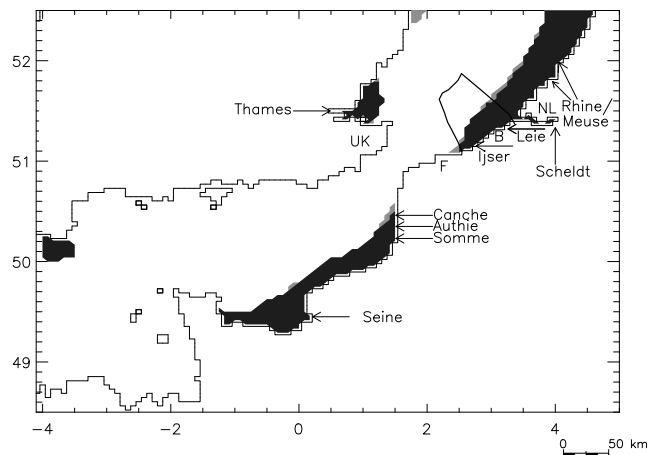
Black: number of days (Phaeocystis > 150 mgC/m³) > 30 days

C



Black: winter N:P ratio > 25 mmolN/mmolP

F



Black: problem area, Grey: potential problem area, White: non-problem area

Figure 7. Critères d'eutrophisation de catégorie I (degré d'enrichissement en nutriments) et II (effets directs de l'enrichissement en nutriments) et état d'eutrophisation des eaux côtières

belges calculés par le modèle MIRO&CO-3D (moyenne 1994-2003) d'après les paramètres du "OSPAR eutrophisation assessment" (2002). A) concentration hivernale en DIN, B) concentration hivernale en DIP, C) rapport N:P, D) maximum de chlorophylle, E) biomasse de *Phaeocystis* et F) état d'eutrophisation (NPA: "Non-Problem Area", PPA: "Potential Problem Area", PA: "Problem Area"), Blanc : régions pour lesquelles les valeurs sont inférieures aux seuils belges. Noir : régions pour lesquelles les valeurs sont supérieures aux seuils belges (niveaux élevés).

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

Évaluation du rôle des apports de nutriments (i) marins, y compris transfrontaliers et (ii) depuis les bassins versants de la Somme, la Seine et l'Escaut jusqu'en Manche et baie sud de la Mer du Nord sur l'eutrophisation des zones côtières.

Outils adaptables à d'autres zones.

- Recommandations et limites éventuelles :

Les conclusions émises dans ce projet sont le résultat de calculs numériques issus de modèles calibrés et validés. Cependant, il est bien entendu que ces résultats ne peuvent être considérés comme le parfait reflet de la réalité eu égard à la complexité des processus mis en jeu. La précision est toutefois adaptée pour définir des lignes de conduite en terme de gestion.

- Réalisations pratiques et valorisation :

Voir section consacrée à la valorisation issue du projet

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES

Le présent projet a permis de renforcer et/ou de consolider les relations entre les organismes suivants :

Ifremer - Centre Manche Mer du Nord, Laboratoire Environnement et Ressources - 150, quai Gambetta, BP 699 - 62321 Boulogne-sur-Mer Cédex

Ifremer - Centre de Brest, Département DYNAMique de l'Environnement COTier BP70 - 29280 Plouzané

ESA-ULB : Écologie des Systèmes Aquatiques, Université Libre de Bruxelles Campus de la Plaine, CP221, Boulevard du Triomphe - 1050 Bruxelles (Belgique)

UMR 7619 Sisyphe, CNRS-Université Pierre & Marie Curie, 4 place Jussieu - 75005 Paris.

POUR EN SAVOIR PLUS

Consultation du site web dédié au projet: <http://www.ifremer.fr/presentation/liteau/liteau-htm>

Références :

Billen G., Garnier J. and Hanset P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289 : 119-137.

Garnier J., Billen G. & Coste M. (1995). Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limnol. & Oceanogr.* 40 : 750-765.

Garnier J., Billen G., Hannon E., Fonbonne S., Videnina Y. & Soulie M. (2002). Modeling transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River. *Estuar. Coast. Shelf Sciences*, 54 : 285-308.

Lancelot C., Spitz Y., Gypens N., Ruddick K., Becquevort S., Rousseau V., Lacroix G. & Billen G. (2005). Modelling diatom and *Phaeocystis* blooms and nutrient cycles in the Southern Bight of the North Sea: the MIRO model. *Mar. Ecology Prog. Ser.*, 289 : 63–78.

OSPAR, 2002. Common assessment Criteria, their assessment levels and Area classification within the comprehensive procedure of the common procedure. OSPAR Commission. Ref. No. 2002-20.

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

(Page suivante)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Publications scientifiques parues :

- Billen G., Garnier J. and Rousseau V., (2005). Nutrient fluxes and water quality in the drainage network of the Scheldt basin over the last 50 years. *Hydrobiologia*, 540 : 47-67.
- Billen G., Garnier J., Nemery J., Sebilo M., Sferratore A., Barles S., Benoit M., (2007). A long term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *The Science of the Total Environment*, 275, 80-97.
- Billen G., Garnier J., (2007). River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non siliceous algae. *Marine Chemistry*, 106, 148-160.
- Even S., Billen G., Bacq N., Théry S., Ruelland D., Garnier J., Cugier P., Poulin M., Blanc S., Lamy F., Paffoni C., (2007). New tools for modelling water quality of hydro-systems : an application in the Seine River basin in the frame of the Water Framework Directive. *The Science of the Total Environment*, 37, 274-291.
- Lancelot C., Gypens N., Billen G., Garnier J., and Roubeix V., 2006. Testing an integrated river–ocean mathematical tool for linking marine eutrophication to land use: The *Phaeocystis*-dominated Belgian coastal zone (Southern North Sea) over the past 50 years. *Journal of Marine System*, 64, 216-228.
- Ménesguen A., Cugier P., Loyer S., Vanhoutte-Brunier A., Hoch T., Guillaud J.-F., Gohin F., 2007. Two- or three-layered box-models versus fine 3D-models for coastal ecological modelling ? A comparative study in the English Channel (Western Europe). *J. Mar. Sys.*, 64, 47-65.
- Ruelland D., Billen G., Brunstein D. & Garnier J., (2007). SENEQUE : a multi-scaled GIS interface to the RIVERSTRAHLER model of the biogeochemical functioning of river systems. *The Science of the Total Environment*, 375, 257–273.
- Sferratore A., Garnier J., Billen G., Conley D., Pinault S., (2006). Silica diffuse and point sources in the Seine watershed. *Environmental Science & Technology* 40 : 6630-6635.
- Vanhoutte-Brunier A., Fernand L., Ménesguen A., Lyons S., Gohin F., Cugier P., 2008. Modelling the *Karenia mikimotoi* bloom that occurred in the western English Channel during summer 2003. *Ecol. Mod.*, 210, 351-376.

Publications scientifiques à paraître :

- Gypens N., Lacroix G., Lancelot C.. Causes of variability in diatom and *Phaeocystis* blooms in Belgian coastal waters between 1989 and 2003 : A model study. *Journal of Sea Research*, sous presse.
- Lacroix G., Ruddick K., and Lancelot C. Does reducing river nutrient discharge reduce coastal eutrophication in Belgian waters ? Special Issue of *Hydrobiologia* – Proceedings of “Research and Management of Eutrophication in Coastal Ecosystems”, 20-23 June 2006 Nyborg, Denmark, en soumission.
- Lacroix G., Ruddick K., Gypens N. and Lancelot C.. Modelling the relative impact of Rivers (Scheldt/Rhine/Seine) and Western Channel waters on the nutrient and diatoms/*Phaeocystis* distributions in Belgian waters (Southern North Sea). *Continental Shelf Research*, en soumission.
- Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Lefebvre A., Cugier P., 2008. Using a nitrogen-tracking technique in a 3D model of the primary production to assess the fueling sources of *Phaeocystis globosa* blooms in the eastern English Channel and the southern North Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, en révision

COLLOQUES	
Participations passées à des colloques :	
Lefebvre A., Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Cugier P., Lancelot C., Lacroix G., Billen G., Garnier J., 2004. Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche – Mer du Nord. Journée LITEAU du 18/11/04, MEDD, Paris.	
THESES	
Thèses passées	2 (en lien avec le projet – financements autres)
Thèses en cours	
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	9 (<i>cf. supra</i>)
Articles de valorisation à paraître	4 (<i>cf. supra</i>)
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	
Actions vers les médias prévues	
ENSEIGNEMENT - FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	Non quantifiable (<i>intégré dans des présentations</i>)
Enseignements/formations prévus	Non quantifiable (<i>générales sur l'eutrophisation</i>)
EXPERTISES	
Expertises menées	OSPAR – groupe ICG-EMO ¹ – 1 ^{er} colloque (2005)
Expertises en cours	OSPAR – groupe ICG-EMO – 2 ^{ième} colloque (2007)
Expertises prévues	OSPAR – Rapportage français pour le QSR ² 2010
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites	Outils de modélisation (Écosystèmes Marins et bassins versants) Indicateur de potentiel d'eutrophisation des apports fluviaux (ICEP)
méthodologies en cours d'élaboration	
méthodologies prévues	

(1) ICG – EMO : Intersessional Correspondance Group – Eutrophication Modelling

(2) QSR 2010 : Quality Status Report 2010

AUTRES

Posters :

Lefebvre A., Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Cugier P., Lancelot C., Lacroix G., Billen G., Garnier J., 2004. Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche – Mer du Nord. Journée Liteau, MEDD, Paris, 18 novembre 2004.

Lefebvre A., Billen G., Cugier P., Garnier J., Gypens N., Lacroix G., Lancelot C., Ménesguen A., Vanhoutte-Brunier A., LITEAU II « Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche et Baie Sud de la Mer du Nord ». Colloque PNEC – LITEAU « Développements récents de la recherche en environnement côtier », Nantes, 26-28 juin 2006.

Rapports :

Barbet F., 2006. Implantation du modèle d'écosystème ECOMARS3D au laboratoire Environnement & Ressources du centre Ifremer Manche Mer du Nord en lien avec le projet LITEAU II. Ifremer/TMR.LER.BL/06.07, 64 p.

Barbet F., Lefebvre A., Cugier P., Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Dumas F., 2006. Le modèle ECOMARS 3D Notice d'utilisation. Ifremer/RST.LER.BL/06.08, 113 pages + Annexes.

RESUMES

RESUME

L'objectif du projet consistait essentiellement à fournir des éléments d'appréciation quantitative des conséquences passées et futures des apports de nutriments par les fleuves du littoral franco-belge (Seine, Somme, Escaut) sur l'état d'eutrophisation de la Manche-Mer du Nord. Ce projet vient donc directement en appui à la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (directive 2000/60/CE), dans le cadre de l'axe 2.1 (Définition des états écologiques) de l'APR LITEAU 2. Il reprend et généralise à toute la Manche-est et le sud de la Mer du Nord les résultats d'un premier projet réalisé dans le cadre du Programme LITEAU 1, qui a permis de mettre au point la démarche sur le cas du bassin versant de la Seine et de son réceptacle marin immédiat, la Baie de Seine.

La méthode consiste à :

- (i) réaliser les simulations des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et de la silice sur les bassins versants de la Somme et de l'Escaut, ainsi qu'il a été déjà fait pour le réseau hydrographique de la Seine et à les valider sur les séries de mesures disponibles, notamment quant à la simulation réaliste de l'évolution passée des flux de nutriments à l'exutoire.
- (ii) fournir ces chroniques de flux simulées en entrée du modèle 3D de la Manche-Mer du Nord méridionale actuellement en cours de mise au point à l'IFREMER et à l'UGMM, et à valider sur les années récentes les répartitions observées des nutriments et des blooms phytoplanctoniques marins.
- (iii) appliquer l'ensemble des modèles des 3 bassins versants et de la Manche-Mer du Nord pour tester divers scénarios d'évolution future et à fournir ainsi une aide à la décision en matière de gestion du milieu littoral et du bassin versant qui l'influence.

Les résultats concernent l'évaluation d'une situation dite « pristine » de la production phytoplanctonique en Manche-Mer du Nord, conformément à l'esprit de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, par rapport à laquelle il sera plus aisé de placer à la fois la situation eutrophisée actuelle et les effets attendus de politiques plausibles de réduction des apports de nutriments par les 3 fleuves étudiés.

Les simulations permettent en outre de quantifier la part respective des 3 fleuves dans les flux inorganiques et organiques transmis à la partie nord de la Mer du Nord, contribuant à clarifier le rôle des apports franco-belges à l'eutrophisation de la Mer du Nord.

Les séries de données historiques ainsi que la modélisation ont été utilisées afin (i) de définir des indicateurs (exemple de l'ICEP – Indicateur du Potentiel d'Eutrophisation Côtière) et (ii) de contribuer à la livraison du produit JAMP EA-5 de la convention OSPAR relatif à la nécessité d'évaluer le statut de la zone maritime OSPAR au regard de l'eutrophisation (en intégrant les transports transfrontaliers) après mise en œuvre des mesures convenues.

MOTS CLES

Manche, baie sud de la Mer du Nord, eutrophisation, modélisation, continuum bassin versant – zone côtière, DCE, OSPAR

ABSTRACT

The main aim of the project was to produce quantitative assessment elements on past and future consequences of nutrient inputs from French and Belgian coastal rivers (Seine, Somme, Escaut) with regards to eutrophication status in the English Channel – North Sea. This project will reinforce implementation of the Water Framework Directive (2000/60/CE), in the context of the 2.1. axis (Definition of ecological status) from APR LITEAU II. This project implements and generalizes to the whole eastern English Channel and the southern bight of the North Sea the results from LITEAU I Programme which allowed the development of this application on the Seine watershed and the Baie de Seine estuary.

The method consists in :

- (i) the simulating the Nitrogen, the Phosphorus and the Silicate biogeochemical cycles on the Somme' and the Escaut' watersheds (as it was done for the Seine), with validation on available *in situ* data, particularly for the realistic simulation of past changes in nutrient fluxes from the outlet.
- (ii) forcing the 3D numerical models of the English Channel and the North Sea with this chronicle of simulated fluxes, with validation on recent years of nutrient and phytoplanktonic blooms field distribution.
- (iii) applying the models of the three watersheds and from the English Channel and the North Sea to test different scenarios of future change and also to provide a tool for management of the coastal areas and the watersheds connected to the estuary.

Results provided an assessment of the pristine situation for the phytoplanktonic production in the English Channel and the North Sea, in concordance with the Water Framework Directive objectives of the definition of actual status with regard to eutrophication and evaluation of the expected situation of the eutrophication status following the reduction target for nutrient inputs from these three main rivers.

Simulations allow the quantification of the respective part of the three rivers inputs in inorganic and organic fluxes transported from the English Channel to the North Sea in order to clarify the role of the inputs from French and Belgium areas in the eutrophication process of the North Sea.

Historical data sets and modelisation were also used (i) to define water quality indicators (ICEP – Indicator of Coastal Eutrophication Potential) and (ii) to answer the JAMP product EA-5 of the OSPAR convention about the requirement of an assessment of the expected eutrophication status (including transboundary nutrient fluxes) of the OSPAR maritime area following the implementation of agreed measures.

KEY WORDS

English Channel, southern bight of the North Sea, eutrophication, modelisation, watershed – coastal zone continuum, WFD, OSPAR