

Programme scientifique Seine-Aval

16 • Les modèles

Outils de connaissance et de gestion

Coordinateur
Bénédicte Thouvenin



16 - Les modèles : outils
de connaissance et de gestion

16

Programme scientifique
Seine-Aval



Ifremer



575
RES

DREAL NORMANDIE
SMCAP/BARDO
N° d'inventaire : 7364

Les modèles : outils de connaissance et de gestion

Coordinateur : Bénédicte Thouvenin⁽¹⁾

Auteurs : Gilles Billen⁽²⁾, Stéphanie Even⁽³⁾,
Jean-Claude Fischer⁽⁴⁾, Jean-Louis Gonzalez⁽¹⁾,
Pierre Le Hir⁽⁵⁾, Véronique Loizeau⁽⁵⁾,
Jean-Marie Mouchel⁽⁶⁾, Caroline Olivier⁽⁷⁾,
Ricardo Silva Jacinto⁽⁴⁾

Contribution : Baghdad Ouddane⁽⁴⁾

- (1) Ifremer Toulon, Del/pc
- (2) Université Pierre et Marie Curie, laboratoire CNRS, UMR Sisyphe 7619
- (3) CIG, école des mines de Paris
- (4) Université de Lille, laboratoire de chimie analytique et marine
- (5) Ifremer Brest, Del/ec
- (6) Cergrene, école nationale des ponts et chaussées
- (7) Université du Havre, laboratoire de mécanique



Présentation du programme Seine-Aval

Seine-Aval est un programme d'études et de recherches interdisciplinaires à caractère appliqué sur l'estuaire de la Seine qui a débuté en 1995. La zone d'étude couvre les 160 km de Poses (en amont de Rouen) à la baie de Seine.

Il réunit plus d'une centaine de chercheurs dans des disciplines aussi diverses que la physique, la géologie, la chimie, l'écologie, l'écotoxicologie, appartenant à plus d'une vingtaine de laboratoires répartis sur l'ensemble du territoire national et en Belgique.

Le programme Seine-Aval est piloté par un comité exécutif constitué par un directeur, M. Louis-Alexandre Romaña, et trois membres, MM. Daniel Cossa, Ghislain de Marsily et Robert Meyer.

Les objectifs principaux fixés au programme Seine-Aval sont de fournir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème estuarien et de développer des outils d'aide à la décision pour les acteurs régionaux et nationaux :

- dans l'optique d'une restauration de la qualité des eaux de la Seine et de la préservation des milieux naturels de la vallée,
- dans le souci de concilier les différents usages identifiés.

Pour structurer la démarche opérationnelle, quatre axes de recherche ont été développés :

► **Hydrodynamique et transport sédimentaire** : sont concernés le régime des eaux, l'érosion et la sédimentation. Ces processus ont une incidence directe sur la formation du bouchon

vaseux, phénomène majeur pour le fonctionnement du système estuarien. Cet axe permet aussi de comprendre le transport et le devenir des contaminants qu'ils soient chimiques ou biologiques ;

► **Microbiologie et oxygénation** : ont été étudiés les organismes microscopiques jouant un rôle essentiel dans le maintien de la qualité de l'eau, notamment le taux d'oxygène dissous qui connaît de graves déficits en période estivale. Sont concernés aussi les germes d'intérêt sanitaire ;

► **Dynamique des contaminants** : on cherche la détermination des niveaux de concentrations des contaminants chimiques et à mieux connaître les processus régissant le comportement de certaines espèces chimiques dans l'estuaire ainsi qu'à développer et intégrer la modélisation biogéochimique aux modèles hydro-sédimentaires ;

► **Édifices biologiques** : le constat de l'état biologique de l'estuaire, l'étude des relations trophiques entre les organismes vivants, la bioaccumulation le long de certaines chaînes alimentaires font partie de ce thème. Cela a impliqué de connaître l'état des populations, d'évaluer leur niveau de contamination et d'apprécier les effets de cette contamination sur les organismes (poissons, mollusques bivalves, etc.).

En outre, un important travail de modélisation mathématique a permis d'intégrer les données obtenues dans ces différents domaines. La traduction, sous une forme synthétique et simplifiée, des mécanismes étudiés permet de produire, dans la mesure du possible, des outils descriptifs et prédictifs du fonctionnement de cet écosystème continuellement en cours de réaménagements.



Partenaires du programme Seine-Aval

Le programme scientifique Seine-Aval est inscrit au contrat de plan État-Région de Haute-Normandie et au contrat de plan interrégional du Bassin parisien.

Les travaux et recherches réalisés dans ce cadre sont financés par les partenaires suivants :

- la Région Haute-Normandie (maître d'ouvrage) et les autres Régions du Bassin parisien (Ile-de-France, Basse-Normandie, Pays de la Loire, Centre, Picardie, Champagne-Ardenne, Bourgogne) ;
- le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ;
- les industriels de Haute-Normandie ;
- l'agence de l'Eau Seine-Normandie.



Moyens nautiques

Les moyens nautiques sont fournis par les partenaires suivants :

- l'Ifremer ;
- l'Insu/CNRS ;
- la cellule antipollution de la Seine.

Ifremer



Introduction

L'objectif général du programme Seine-Aval est l'amélioration des connaissances scientifiques sur la basse vallée de la Seine afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'écosystème estuarien. Dans ce but, des modèles mathématiques ont été utilisés en complément des mesures, des observations sur le terrain et des études sur les processus. Les modèles sont en effet des outils de recherche et de synthèse qui permettent de tester notre compréhension des phénomènes et de simuler leurs variabilités spatiales et temporelles à l'échelle d'un estuaire. Ils peuvent également devenir, dans certaines conditions, des outils opérationnels aidant à la gestion intégrée du milieu.

Le programme Seine-Aval est un programme d'études pluridisciplinaires qui s'est attaché à répondre à plusieurs questions concernant le mouvement des masses d'eau, le comportement des sédiments fins, la qualité de l'eau dans l'estuaire, tant du point de vue de l'oxygénation que de celui de la contamination chimique.

Les résultats scientifiques de ces études sont exposés dans une série de fascicules thématiques qui décrivent, pour chaque sujet, les connaissances acquises et les enseignements à tirer de la compréhension actuelle du système dans le domaine de la gestion de l'estuaire. Pour chacun des thèmes de recherche, il est fait référence aux outils utilisés et notamment aux modèles mathématiques. Ceux-ci peuvent varier selon les disciplines. La profusion de ces modèles et leurs interactions par couplage ou non ont conduit à proposer un fascicule supplémentaire pour présenter de façon synthétique tous les modèles qui ont été développés et utilisés dans le cadre du programme Seine-Aval.

L'objet de ce document est donc d'une part de présenter ces différents modèles qui correspondent aux multiples processus en jeu et, d'autre part, d'exposer la stratégie globale qui a conduit au développement de modèles spatialisés couplés avec des modèles de processus.

En effet, on distingue dans le programme Seine-Aval deux types de modèles :

- **les modèles spatialisés**, appelés ici modèles de transport multivariable^o, qui étudient le mouvement et le mélange des masses d'eau, le transport de plusieurs variables aussi bien dissoutes que particulaires ;

- **les modèles de processus**. Il peut s'agir de processus physiques, chimiques et/ou biologiques ; ces modèles peuvent être ou ne pas être intégrés dans les modèles spatialisés. Une définition des modèles mathématiques et les notions de base qui président à leur bonne compréhension sont rappelées dans une annexe à la fin du fascicule.

Les objectifs poursuivis par les scientifiques en développant des modèles mathématiques dans le cadre du programme Seine-Aval sont présentés dans le chapitre I. La démarche globale adoptée pour répondre à ces objectifs est décrite dans ce chapitre avant de présenter de façon plus détaillée les modèles eux-mêmes (chapitres II, III et IV).

Chaque modèle est décrit de façon succincte. Les caractéristiques générales concernant leurs objectifs propres et les échelles spatio-temporelles correspondantes sont mises en évidence. Certains modèles sont présentés de façon plus détaillée et technique dans des encadrés. Les laboratoires qui développent et/ou utilisent chacun de ces modèles sont spécifiés au début de chaque présentation.

Le chapitre V traite du couplage des modèles et des interactions possibles entre eux. Des exemples d'applications sont donnés, ainsi que les limites actuelles des modèles qui reflètent certaines difficultés rencontrées pour décrire le comportement de ce milieu très complexe.

(*) expliqué dans le glossaire.

(^o) expliqué dans l'annexe.

Sommaire

Introduction	3	Annexe	
Chapitre I - Objectifs des modèles et démarche adoptée		Notions préliminaires sur les modèles mathématiques en océanographie côtière et estuarienne -	
Problématique	4	Définitions de quelques termes	27
Échelles spatio-temporelles	4	Les modèles spatialisés (transport multivariable)	27
Démarche adoptée	5	Les modèles de processus	28
Utilisation opérationnelle	6	Le couplage des modèles	28
Chapitre II - Modèles de transport multivariable		Grille de calcul	28
Présentation du modèle MODESTE (modèle de l'estuaire)	8	Notions sur la dispersion	29
Présentation du modèle SAM (Simulation Advection Multivariable)	8	Les variables	30
Chapitre III - Modèles de processus physiques		Les conditions aux limites et les conditions initiales	30
HISWA : Hindcast Shallow Water Waves	12	Les paramètres	30
WAVEMUD : modèle de liquéfaction des vases	12	La validation et la calibration	31
Floculation : modèle unidimensionnel vertical	13	Références bibliographiques	31
Tassement : module intégré en option dans SAM	14	Glossaire	32
MOFEA : modèle fin estuaire amont	14		
Chapitre IV - Modèles de processus chimiques, biologiques et biochimiques			
Processus microbiologiques : modèle RIVE	15		
Processus chimiques	15		
Modélisation du manganèse	15		
Moco : modèle de complexation	16		
Processus biologiques de bioaccumulation de polluants : cas des PCB	18		
Chapitre V - Couplage des modèles - Applications - Limites			
Applications	23		
Couplage et liaisons amont-aval	25		
Limites	25		
Conclusion	26		

phosphore du bassin versant. Ces études sont donc étroitement associées à celles du fleuve Seine en amont de Poses ;
 - pour la dynamique des contaminants, le cas du cadmium* a été étudié et les réactions d'adsorption*-désorption* sont accentuées dans la zone de fort gradient* de salinité, qui est aussi une zone très turbide, dans l'estuaire aval et la baie de Seine.

La dynamique des particules est très sensible aux variations bathymétriques et hydrodynamiques. Les échelles spatiales et temporelles sont le plus souvent beaucoup plus fines que celles des autres disciplines. Or, l'efficacité d'un modèle, tant du point de vue de la gestion globale de l'estuaire que de celui de la compréhension des processus, est d'autant plus grande qu'il est capable de répondre sur des échelles de temps longues, puisque l'évolution de la qualité de l'eau et le devenir des éléments associés aux particules se révèlent le plus souvent sur des échelles de temps au moins saisonnières si ce n'est annuelles (fig. 1). Outre les temps de calcul très importants, la difficulté pour simuler des échelles de temps saisonnières réside dans la prise en compte des forçages* sur le long terme (succession de tempêtes par exemple) et dans l'accumulation des petites erreurs du modèle qui peut entraîner une dérive des résultats vers une solution non réaliste.

Démarche adoptée

Afin de développer des modèles qui répondent à ces exigences, la démarche suivie dans le programme Seine-Aval en matière de modélisation a été le couplage de modèles :
 - des modèles de transport multivariable à l'échelle de l'estuaire ont été mis au point à différentes échelles spatiales, avec différentes résolutions du maillage° ;

- des modèles de processus° plus spécialisés ont été développés pour décrire les comportements physiques, chimiques, biochimiques ou biologiques.

Le couplage des modèles de transport spatialisés et des modèles de processus permet une intégration des différentes disciplines en tenant compte des interactions dans l'espace et dans le temps de plusieurs processus. Il est alors possible, dans certains cas, de hiérarchiser les facteurs d'influence de tel ou tel comportement observé dans l'estuaire.

Tout modèle se construit en liaison directe avec des mesures sur le terrain et avec des expériences en laboratoire. Les figures 2 et 3 décrivent cette démarche de va-et-vient entre le modèle et les mesures, qui est une des bases du développement d'outils performants.

Les hypothèses et les concepts utilisés pour reproduire chaque phénomène reposent sur l'observation en milieu naturel ou confiné. Les paramètres*° et les informations dont le modèle dépend sont issus de mesures. Sa validité° est constamment renforcée par des vérifications et des comparaisons avec le terrain. Les discordances constatées entre les résultats des modèles et les observations permettent d'orienter la recherche vers une meilleure compréhension des processus impliqués.

En effet, le modèle apporte des informations sur certains processus prépondérants à analyser plus finement, sur les variations spatiales et temporelles du milieu qu'il n'est pas toujours facile de capter par des mesures sur le terrain, toujours en nombre limité. Des stratégies d'échantillonnage peuvent ainsi être proposées ou validées. Des événements non observés *a priori* peuvent être révélés et conduire à un choix plus approprié dans l'effort de mesures.

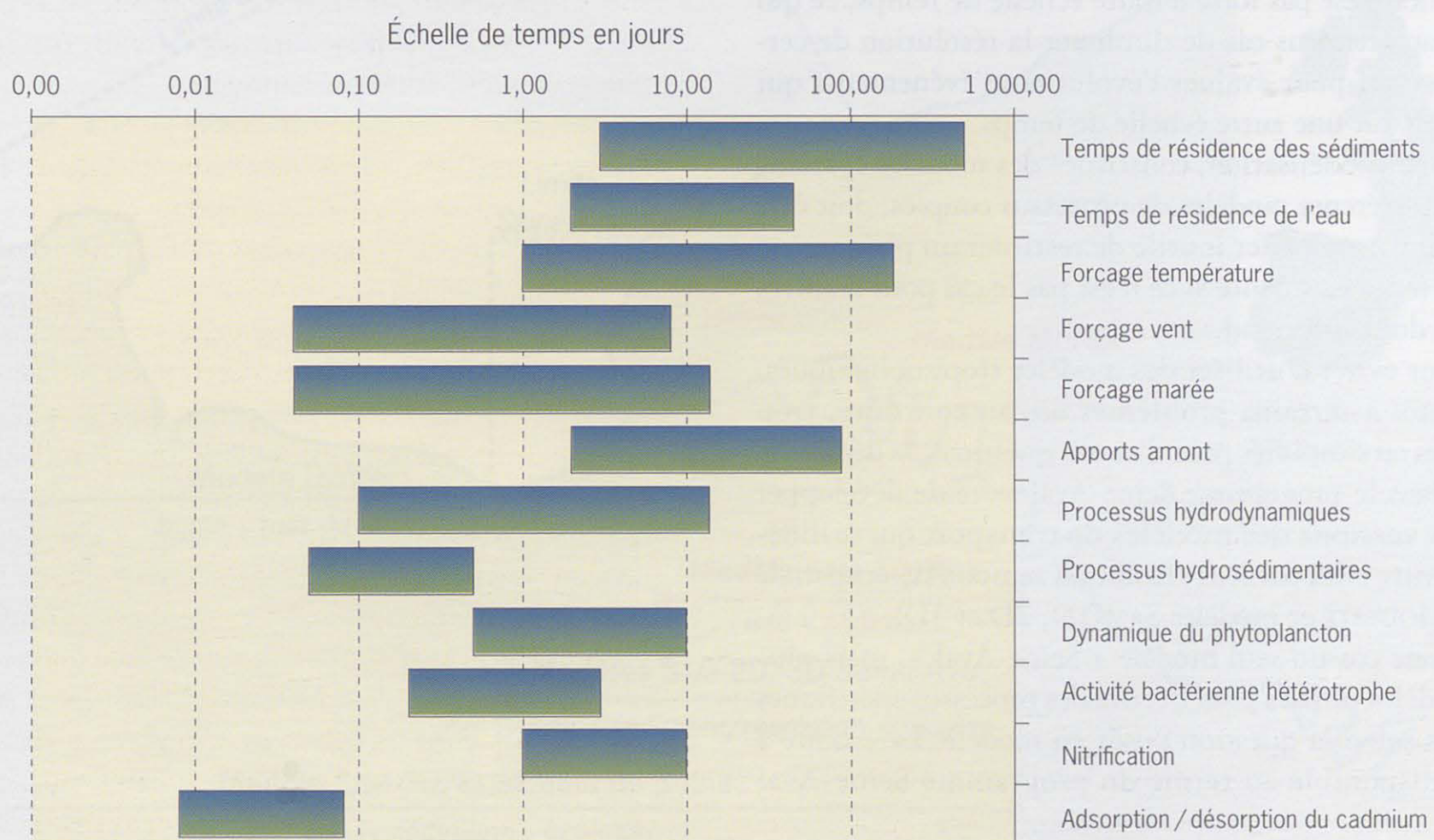


Figure 1 - Ordres de grandeur des échelles de temps pour certaines disciplines, forçages ou processus.

Chapitre I

Objectifs des modèles et démarche adoptée

Le programme Seine-Aval a proposé une démarche intégrée et pluridisciplinaire afin d'approcher les problèmes liés à la qualité des eaux. Pour aborder les études sur la contamination chimique et la désoxygénation du milieu, il est nécessaire d'étudier aussi le mouvement des masses d'eau et des sédiments en suspension qui sont des supports pour certains contaminants, bactéries et autre matériel vivant ou détritique. L'objectif est également de développer des outils permettant de mieux gérer l'estuaire face aux demandes d'aménagements et de rejets qui pourraient contribuer à affecter ce milieu fragile et déjà perturbé.

Une des démarches adoptées a été une approche quantitative faisant appel à la modélisation mathématique et à la compréhension des processus qui déterminent l'évolution du système°. S'appuyant sur les observations effectuées dans le milieu naturel, les modèles constituent des outils d'analyse et de synthèse qui permettent une vision intégrée des phénomènes et apportent des éléments de réponse de plus en plus précis au fur et à mesure de leur perfectionnement. À terme, ils peuvent être utilisés comme outils de gestion.

Problématique

La modélisation dans le programme Seine-Aval a donc été structurée en fonction des trois grandes questions posées.

• Le transport sédimentaire

Quel est le fonctionnement actuel de l'estuaire en ce qui concerne les particules fines (vecteurs de contaminations chimique et bactérienne)? : problème d'aménagement lié à la présence du bouchon vaseux*, pérennité des vasières, zones d'érosion et zones de comblement.

• Le contrôle de l'oxygénation

Quels sont les processus chimiques et biologiques qui sont à l'origine des graves déficits en oxygène dissous observés dans l'estuaire de la Seine?

• La contamination chimique

Qu'en est-il actuellement de la contamination chimique? : approche de la modélisation de certains contaminants pour mieux comprendre leur devenir lors du passage eau douce - eau marine et tenter d'évaluer les différences entre les flux bruts* qui arrivent par le fleuve et les flux nets qui sortent de l'estuaire vers la baie de Seine; rôle du bouchon vaseux dans les transferts de contaminants (ou transformations chimiques); transfert de certains contaminants dans la chaîne trophique*.

Ces questions font appel à des disciplines différentes qui sont interdépendantes. La démarche de modélisation doit donc être intégrée pour prendre en compte à la fois le transport des éléments dissous, le mélange des eaux marines et

des eaux douces, la dynamique des particules, leur stockage éventuel dans certaines zones ainsi que les processus biochimiques qui affectent la qualité de l'eau.

Échelles spatio-temporelles

Le choix des outils de modélisation va fortement dépendre des échelles de temps et d'espace correspondant aux objectifs recherchés. Les objectifs du programme Seine-Aval ont été considérés comme **des objectifs à court et moyen termes**, c'est-à-dire que l'étude des phénomènes porte sur **le cycle saisonnier ou annuel**, bien que les processus soient également étudiés sur **le cycle de marée** pour mieux les comprendre.

La variabilité est très importante en estuaire et décrit plusieurs cycles : cycle de marée, cycle journalier, cycle lunaire, cycle saisonnier, cycle annuel et tendance pluriannuelle auxquels s'ajoute la variabilité issue de processus non périodiques (tempêtes, crues, apports...).

Les questions posées sont souvent **pluridisciplinaires**; or, les **échelles de temps** caractéristiques des différents processus varient, selon les cas, de l'heure à la dizaine de jours (fig. 1). De nombreux processus sont rapides mais leur vitesse varie selon un cycle lent correspondant aux variations naturelles du régime hydrographique, des apports, de la température, de l'ensoleillement, du recrutement pour les espèces biologiques, etc. Il existe donc dans le milieu une variabilité d'échelle de temps importante, qui conduit à étudier l'évolution de la qualité des eaux sur des cycles saisonniers, annuels, voire pluriannuels.

L'échelle spatiale des modèles développés dans le programme Seine-Aval est essentiellement celle de l'estuaire de la Seine, couvrant la partie orientale de la baie de Seine jusqu'à la limite de propagation de la marée dynamique, située à Poses (160 km en amont de l'embouchure). Les zones d'étude privilégiées pour chaque discipline ne sont pas toujours les mêmes. Elles correspondent aux régions dans lesquelles l'évolution des processus est la plus déterminante; chacune d'entre elles est définie de telle façon que l'absence d'information précise sur les limites reste sans importance sur les processus internes étudiés :

- pour le transport sédimentaire, la partie aval de l'estuaire (baie + estuaire aval + estuaire moyen) est la plus intéressante, puisque c'est la zone où évolue le bouchon vaseux qui représente une masse considérable de particules et intervient pour beaucoup dans les bilans de sédiments fins;
- pour la désoxygénation, les processus déterminants étudiés par les microbiologistes se développent dans l'estuaire amont. De plus, ces phénomènes sont liés aux apports d'azote et de

Chapitre II

Modèles de transport multivariable

On appelle modèle de transport multivariable un modèle qui simule le transport d'un nombre quelconque de quantités présentes dans l'eau sous forme dissoute ou particulaire*. Ces modèles couvrent au moins la zone géographique d'étude (estuaire de la Seine) et incluent un modèle hydrodynamique^o pour connaître le mouvement des masses d'eau.

Deux types de modèles de transport à l'échelle de l'estuaire ont été développés et utilisés dans le programme Seine-Aval. Ils correspondent à des besoins différents, associés à des échelles spatio-temporelles distinctes et des applications spécifiques (fig. 4).

- Le modèle MODESTE couvre le *continuum* Seine fluviale - estuaire. Couplé au modèle de processus RIVE, il est dédié à l'étude du fonctionnement écologique du système et constitue un premier outil de recherche pour tester les schémas conceptuels développés pour décrire les processus microbiologiques.

- Le modèle SAM est développé pour toute la zone estuarienne et traite de façon détaillée l'hydrodynamique et le transport sédimentaire. Plusieurs versions ont été dévelop-

pées. Il constitue un outil de base sur lequel sont ou seront couplés les modèles de processus pour décrire le fonctionnement de l'estuaire.

Ces modèles traitent des phénomènes de façon différente en posant des hypothèses correspondant à leurs objectifs. Ils sont présentés de façon détaillée plus loin.

Ils se distinguent sur plusieurs points :

- l'intégration temporelle des équations qui permettent de suivre les mouvements et le transport des masses d'eau en tenant compte ou non des processus liés à la marée ;
- l'intégration spatiale des équations ;
- l'étendue géographique de la zone simulée ;
- le maillage et les techniques de résolution numérique ;
- le traitement des particules et la représentation des processus qui décrivent leur comportement (transport, chute, possibilités de dépôt et de remise en suspension, tassement dans la couche de sédiment, etc.) ;
- les conditions aux limites^o ;
- les forçages.

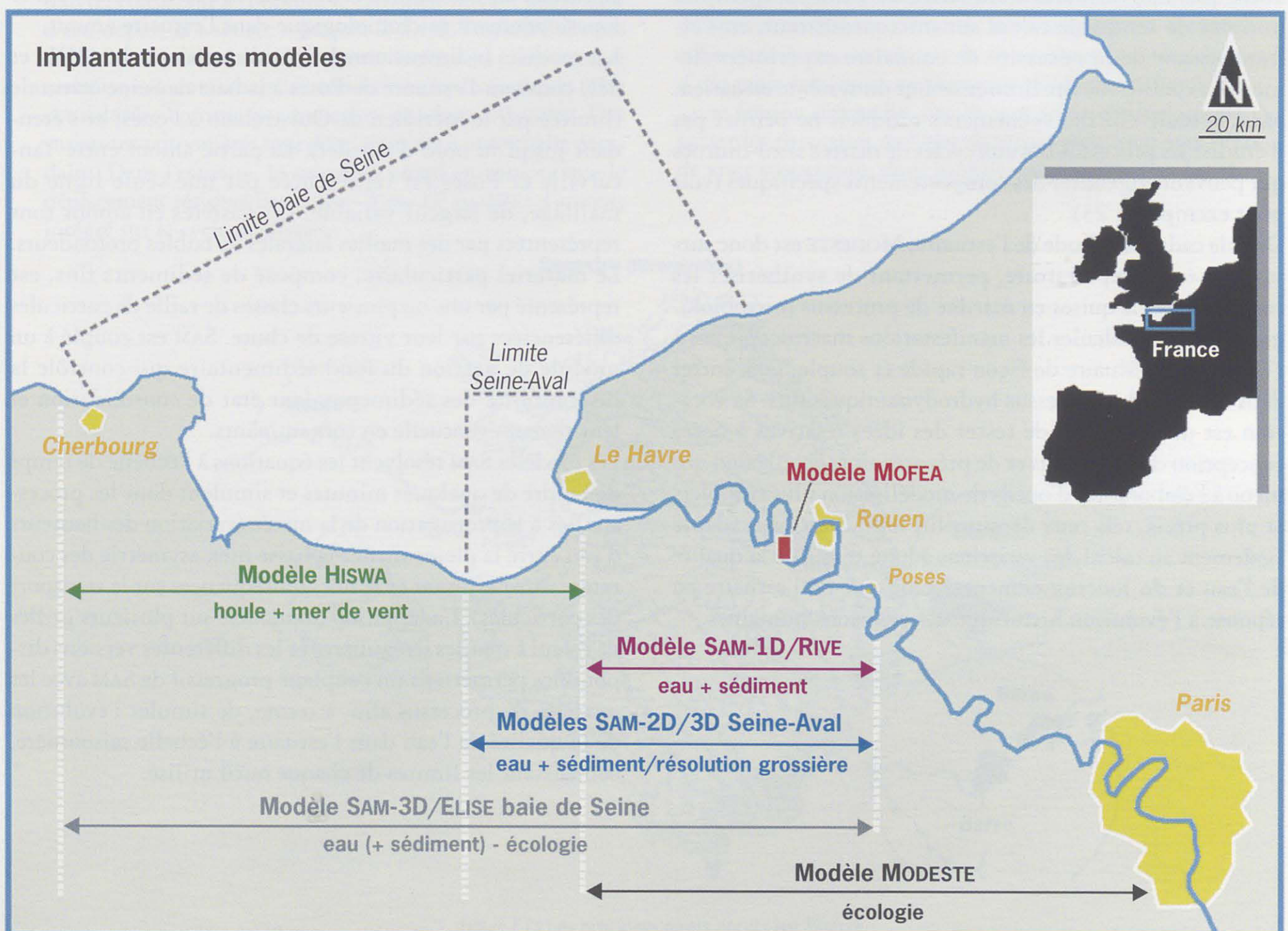


Figure 4 - Emprise spatiale des différents modèles développés dans le programme Seine-Aval.

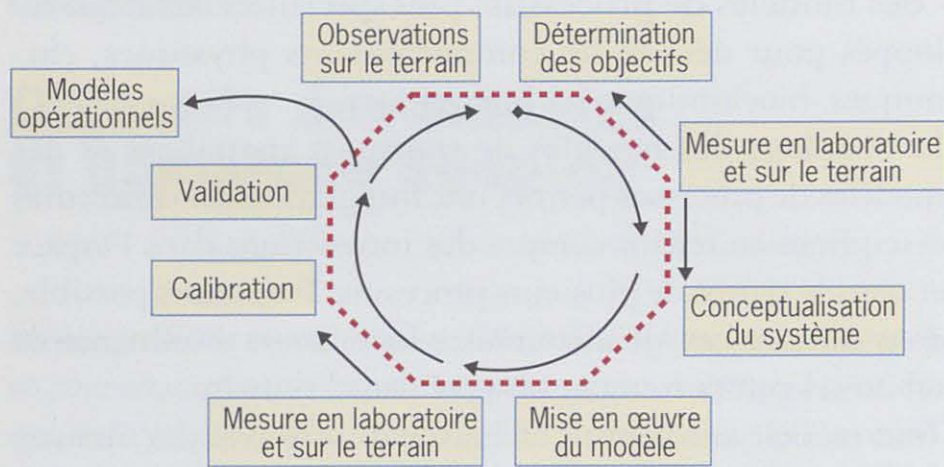


Figure 2 - Démarche globale de développement et d'utilisation des modèles en relation avec les mesures sur le terrain et les expériences en laboratoire.

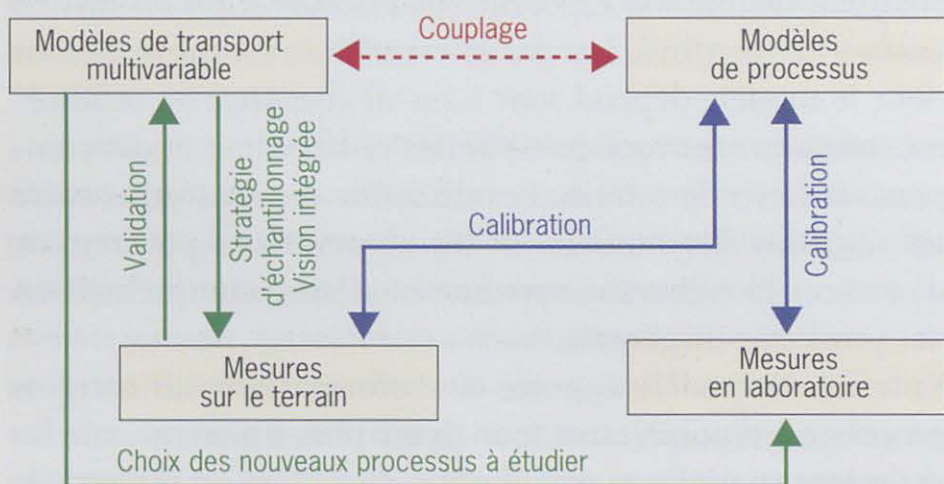


Figure 3 - Démarche de modélisation adoptée dans le programme Seine-Aval. Relation entre les deux types de modèles et les mesures.

Plus le modèle est fin et complet, intégrant de nombreux processus, moins il est maniable ; les temps de calcul deviennent longs et conduisent à devoir réduire le nombre des tests de sensibilité°. Parallèlement, l'interdépendance des phénomènes n'est pas forte à toute échelle de temps, ce qui permet dans certains cas de diminuer la résolution de certains processus pour évaluer l'évolution d'événements qui s'expriment sur une autre échelle de temps.

La chaîne de modélisation, constituée des modèles spatialisés et des différents modèles de processus couplés, doit être cohérente. Il est en effet inutile de restituer un phénomène de façon très performante si ce n'est pas le cas pour d'autres processus dont il dépend.

Ainsi, pour éviter d'utiliser des modèles trop sophistiqués, mal adaptés à certains problèmes ou, au contraire, trop empiriques ou simplifiés pour d'autres questions, la démarche adoptée dans le programme Seine-Aval a été de développer **plusieurs versions des modèles de transport** qui se différencient entre elles par leur résolution temporelle et spatiale (modèle MODESTE et modèles SAM-1D, 2D et 3D).

Il n'y a donc pas un seul modèle « Seine-Aval », mais plusieurs modèles utilisés pour décrire des processus spécifiques et couplés selon la question posée au modèle. La « boîte à outils » disponible au terme du programme Seine-Aval

doit permettre de mieux évaluer leurs capacités de réponse et, à terme, de choisir un ou plusieurs outils opérationnels dont les limites d'application sont connues.

Utilisation opérationnelle

Le modèle est un outil de recherche qui sert à améliorer l'état des connaissances sur le comportement du milieu mais il peut également, à terme, être employé comme outil d'aide à la décision. En effet, si le modèle est suffisamment validé et si ses limites d'application sont bien connues, son utilisation en tant qu'outil opérationnel permet de tester des modifications dans les entrées du modèle pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement du système. La vision intégrée et globale de l'estuaire, avec ses variations spatiales et temporelles, peut donner des indications parlantes de son évolution.

Une des utilisations possibles de ces outils est la fourniture de flux et de bilans qui sont facilement accessibles à la modélisation lorsque celle-ci a été validée par des mesures ponctuelles. L'évaluation de ces quantités à partir de mesures est souvent plus délicate, faute d'un nombre important de valeurs disponibles dans le temps et dans l'espace. Un exemple d'application des modèles a été réalisé avec le modèle MODESTE, utilisé pour simuler des scénarios hypothétiques ou futurs et évaluer l'impact d'une réduction d'apports ou d'un aménagement sur le fonctionnement micro-biologique de l'estuaire amont (voir fascicule « L'oxygène : un témoin du fonctionnement micro-biologique »).

Le modèle MODESTE : présentation technique

MODESTE est la partie la plus aval d'un ensemble de modèles intégrés, rassemblés sous le nom de SENEQUE, couvrant tout le réseau hydrographique de la Seine. À cause de l'impact déterminant de l'agglomération parisienne sur la qualité des eaux estuariennes, le modèle MODESTE considère explicitement l'estuaire comme le prolongement de la Seine fluviale : il couvre l'axe principal de la Seine de la confluence de la Marne jusqu'au début du front salin.

L'ensemble SENEQUE (Billen *et al.*, 1999) permet de calculer la qualité de l'eau (concentrations en oxygène, en nutriments, en chlorophylle...) et d'étudier le fonctionnement écologique (production primaire, respiration, nitrification...) à partir des contraintes imposées par la météorologie (pluviométrie, évapotranspiration) et l'activité humaine (usage du sol, rejets d'eaux usées, gestion hydraulique) sur le bassin.

SENEQUE 1.3 (figure E1) comprend trois applications principales, chacune étant destinée au calcul du fonctionnement d'une des composantes de l'hydrosystème (réseau hydrographique des sous-bassins, barrages-réservoirs et axe principal de la Seine de Orly à Caudebec). L'interfaçage de ces applications est assurée par l'emploi, comme condition d'entrée par chacune, des fichiers résultats d'une autre.

Conduite du calcul et résolution temporelle

Pour le calcul de la qualité de l'eau dans les différents ordres de cours d'eau des sous-bassins, ainsi que dans l'axe principal de la Seine, une démarche lagrangienne* est mise en œuvre, consistant à conduire le calcul en suivant une masse d'eau depuis la « source » jusqu'à la fin de l'estuaire. Le pas de temps de calcul est de 1 heure (ou moins si nécessaire numériquement), mais les conditions hydrologiques sont considérées comme permanentes pendant 10 jours. Des variations saisonnières sont donc simulées à une échelle décennale. Dans l'estuaire, le calcul ne prend en compte que le déplacement résiduel des masses d'eau lié au débit d'amont, intégré sur le cycle de marée.

Prise en compte des processus hydrosédimentaires

Les observations relatives aux matières en suspension et à la dynamique des constituants biologiques particuliers ont montré que le jeu des cycles de sédimentation au jusant et de resuspension au flot conduit à l'établissement dans l'estuaire, après les crues d'hiver, d'un stock de particules échappant au transport vers l'aval. Pour rendre compte de ce phénomène dans le cadre du modèle MODESTE qui ne fait état que du déplacement résiduel des masses d'eau, un schéma original de la dynamique des particules, basé sur le concept de matières en semi-suspension, a été introduit.

L'idée essentielle consiste à évaluer un flux d'érosion à partir de la valeur du flux de sédimentation, d'une part, d'une capacité de transport en suspension dépendante des caractéristiques de l'écoulement d'autre part.

(i) La sédimentation de chaque variable particulaire est régie par la vitesse de chute expérimentalement déterminée de cette variable.

(ii) Il existe une capacité de transport en suspension liée à la puissance hydraulique dissipée par l'écoulement : la concentration d'équilibre en MES est fonction de la vitesse moyenne d'écoulement.

(iii) L'érosion tend à rétablir cette concentration d'équilibre pour autant qu'existe un stock suffisant de sédiment érodable.

Ceci revient à considérer dans l'estuaire :

- une érosion permanente liée aux courants de marée et maintenant en semi-suspension toutes les particules qui sédimentent. Dans cet état de semi-suspension, les particules restent en contact avec la phase dissoute de la colonne d'eau mais échappent au transport résiduel vers l'aval ;
- une érosion résiduelle, liée au seul débit résiduel, qui fait passer les particules de l'état de semi-suspension vers l'état de vraie suspension, donc soumis au transport vers l'aval.

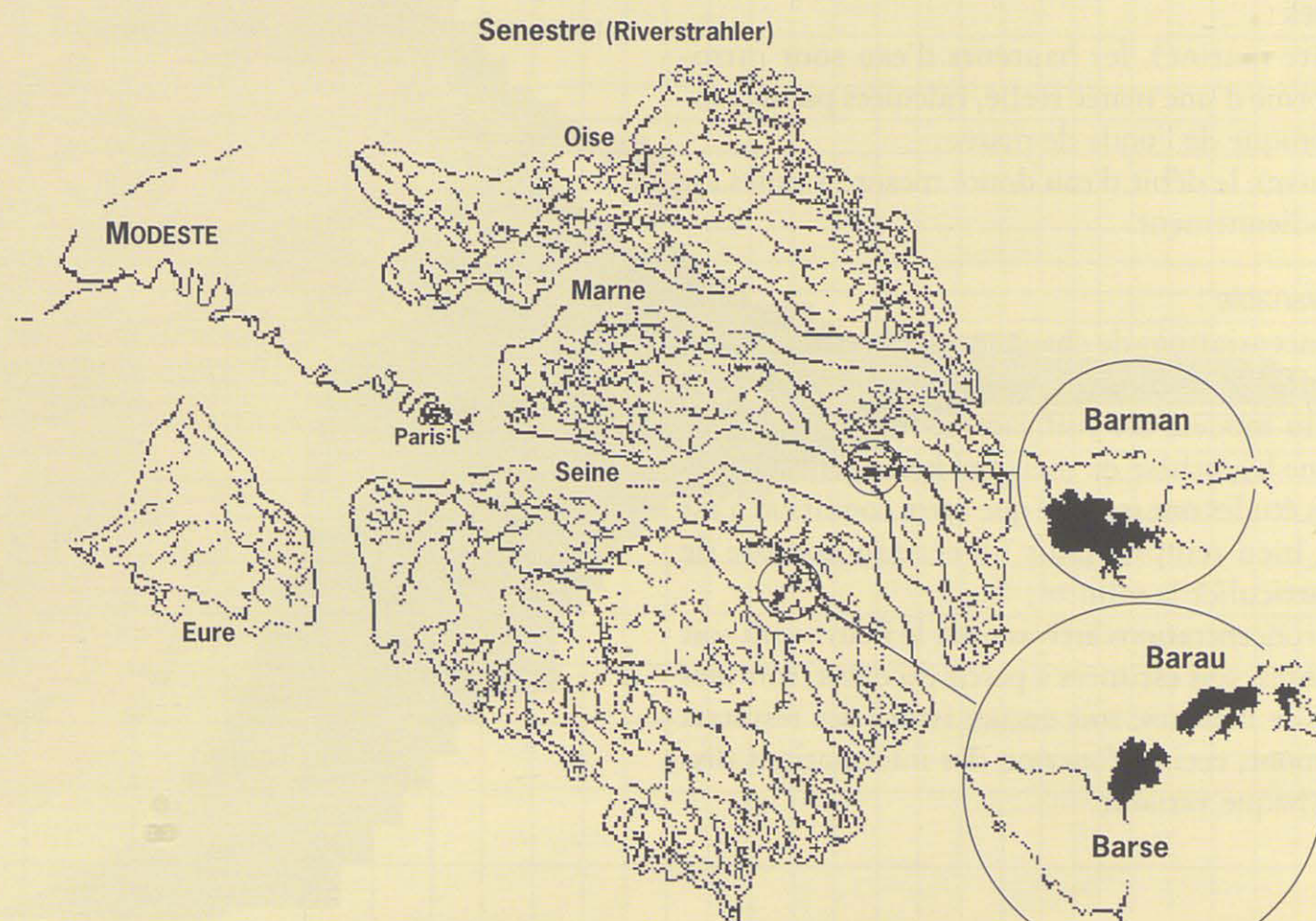


Figure E1 - Les principaux objets décrits par SENEQUE.

Présentation du modèle MODESTE (modèle de l'estuaire)

Laboratoires : Université Pierre et Marie Curie, laboratoire CNRS, UMR Sisyphe 7619
- Université libre de Bruxelles, groupe de microbiologie des milieux aquatiques

Le modèle MODESTE (voir p. 9) est une des composantes du logiciel SENEQUE (« La Seine en équations »), outil de modélisation du fonctionnement biogéochimique de l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine et de ses annexes hydrauliques, développé conjointement dans le cadre des programmes Piren-Seine et Seine-Aval.

La grande emprise spatiale du logiciel SENEQUE, qui cherche à représenter globalement l'effet des pressions anthropiques sur l'hydrosystème à l'échelle de tout le bassin versant, a imposé certaines simplifications dans la représentation géographique du système ainsi que dans la prise en compte des processus liés aux phénomènes de marée.

Ainsi, si le modèle MODESTE repose sur une description détaillée des cinétiques microbiennes (modèle de processus RIVE, p. 15), il ne prend en compte que la circulation résiduelle des masses d'eau imposée par le débit amont, indépendamment des processus de marée. Cette simplification permet au modèle de calculer les variations longitudinales et saisonnières des biomasses et des activités biologiques ainsi que des variables de qualité de l'eau en quelques minutes de temps de calcul sur microordinateur, en s'affranchissant de la nécessité de connaître expérimentalement les conditions aux limites amont du système estuarien. Mais la seule vue des événements résiduels ne permet pas d'étudier les processus liés aux cycles de marées semi-diurnes qui peuvent engendrer des comportements spécifiques (voir pour exemple p. 23)

Dans le cadre de l'étude de l'estuaire, MODESTE est donc surtout un outil exploratoire, permettant de synthétiser les connaissances acquises en matière de processus microbiologiques et d'en calculer les manifestations macroscopiques à l'échelle de l'estuaire de façon rapide et souple, sans entrer dans le détail des processus hydrodynamiques fins. Sa vocation est de permettre de tester des idées relatives à notre conception des processus et de préparer ainsi la réflexion qui mène à l'élaboration d'outils de modélisation plus complets et plus précis, tels ceux décrits plus loin. Il est bien adapté également au calcul des variations à long terme de la qualité de l'eau et du fonctionnement écologique de l'estuaire en réponse à l'évolution historique des pressions humaines.

Présentation du modèle SAM (Simulation Advection Multivariable)

Laboratoires : Ifremer, départements Del/Écologie côtière et Del/Polluants chimiques

Les objectifs poursuivis en développant le modèle de transport multivariable dissous/particulaire SAM (voir p. 10 et 11) étaient :

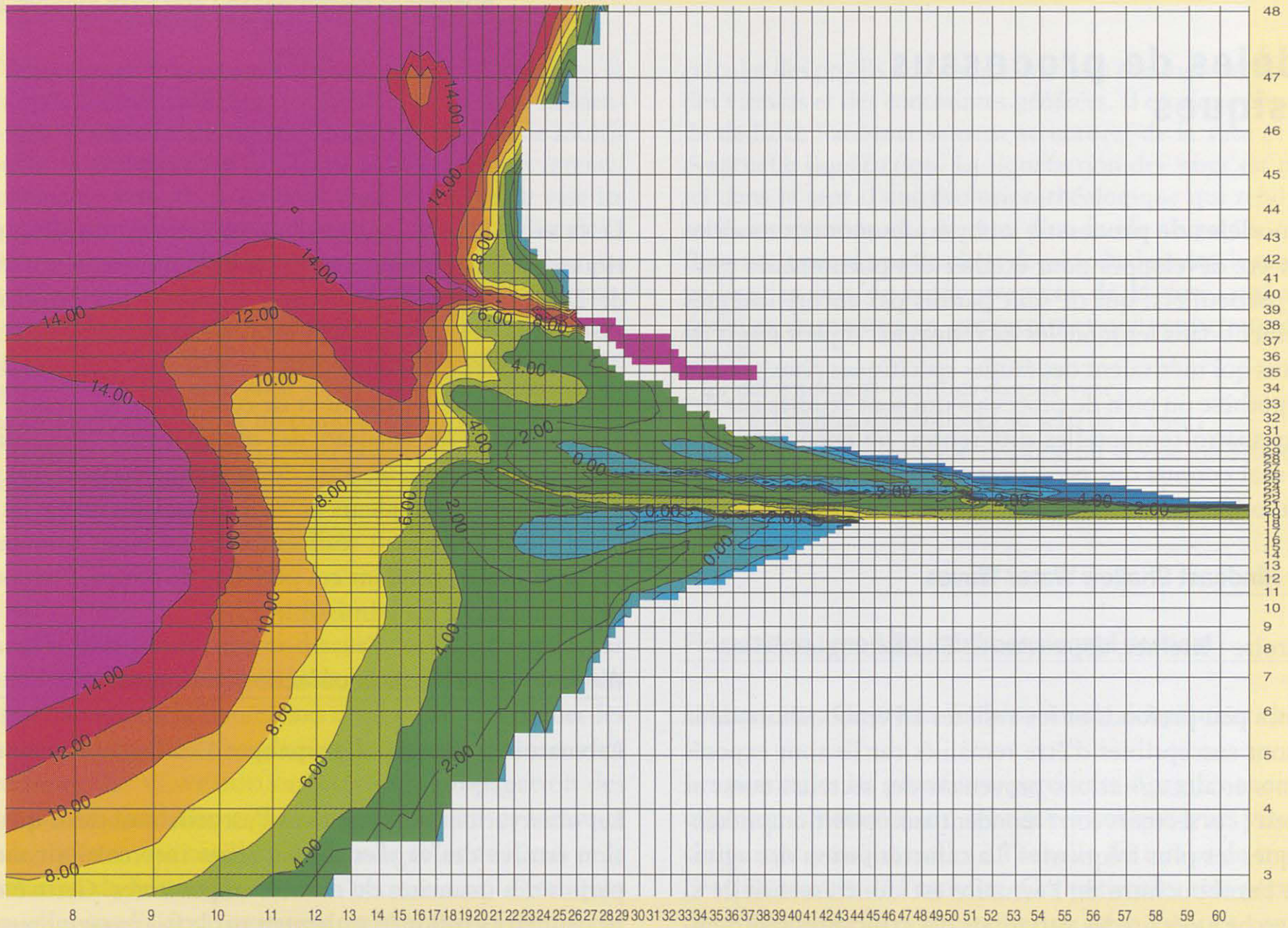
- d'une part, de réactualiser la connaissance des structures turbides de l'estuaire (bouchon vaseux, dépôt de vase...) en liaison avec les études sur le terrain ;
- d'autre part, de mettre en place un modèle devant servir d'outil de base pour la détermination du devenir des contaminants, des nutriments et autres composants de l'écosystème. Du fait de ces multiples objectifs, ce n'est pas un seul modèle qui a été développé mais une chaîne de modélisation, avec plusieurs versions correspondant à des résolutions spatiales différentes (1D, 2DH, 3D, maillage « fin » et maillage « grossier »).

Le modèle unidimensionnel^o (1D) couvre l'estuaire amont de Poses à Honfleur (fig. 4). À cause de cette limite aval positionnée à l'intérieur de l'estuaire moyen, avant qu'il ne s'élargisse de façon trop importante, ce modèle ne résout pas de manière satisfaisante le transport des particules et l'évolution du bouchon vaseux. Il a néanmoins été utilisé pour tester le couplage de SAM avec le modèle de processus RIVE et étudier les conséquences du transport lié à la marée sur le fonctionnement microbiologique dans l'estuaire amont.

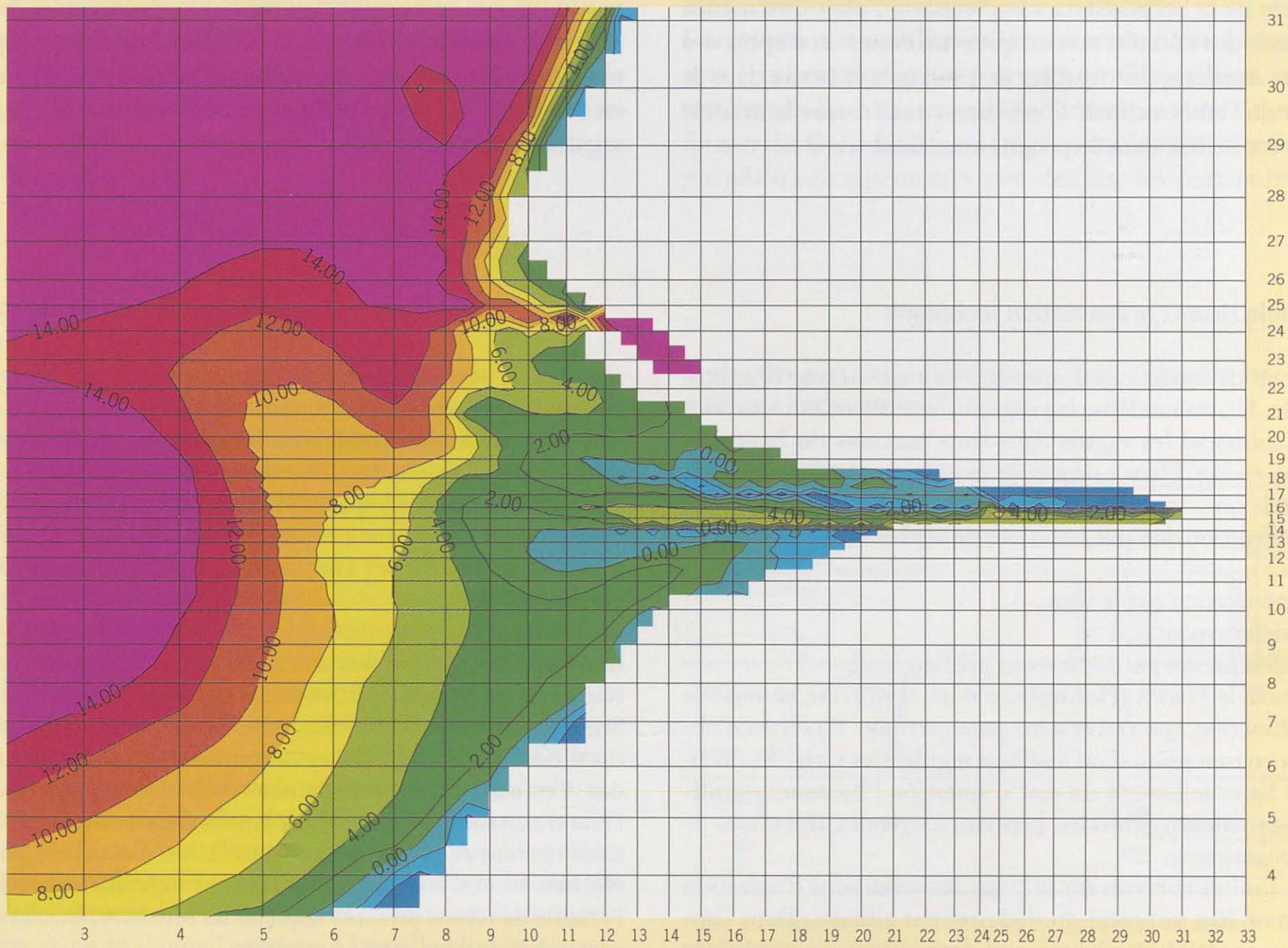
Les modèles bidimensionnels et tridimensionnels^o (2DH et 3D) couvrent l'estuaire de Poses à la baie de Seine orientale (limitée par le méridien de Ouistreham à l'ouest et s'étendant jusqu'au nord d'Antifer). La partie amont entre Tancarville et Poses est représentée par une seule ligne du maillage, de largeur variable. Les vasières en amont sont représentées par des mailles latérales de faibles profondeurs. Le matériel particulaire, composé de sédiments fins, est représenté par une ou plusieurs classes de taille de particules différenciées par leur vitesse de chute. SAM est couplé à un module de gestion du fond sédimentaire qui contrôle la disponibilité des sédiments, leur état de consolidation et leur teneur éventuelle en contaminants.

Les modèles SAM résolvent les équations à l'échelle de temps de l'ordre de quelques minutes et simulent donc les processus liés à la propagation de la marée (variation des hauteurs d'eau entre la pleine mer et la basse mer, asymétrie des courants entre le jusant et le flot, conséquences sur le transport des particules). L'adaptation du modèle sur plusieurs grilles de calcul à mailles irrégulières et les différentes versions disponibles permettent un couplage progressif de SAM avec les modèles de processus afin, à terme, de simuler l'évolution de la qualité de l'eau dans l'estuaire à l'échelle saisonnière, connaissant les limites de chaque outil utilisé.

Cas (a)



Cas (b)



Figures E2a et E2b - Représentation des maillages fin (cas a) et grossier (cas b) dans l'estuaire aval et de la bathymétrie vue par chacun (zoom de l'estuaire aval).

Les modèles SAM : présentation technique

Le modèle de transport multivariable SAM existe en plusieurs versions afin de répondre aux différents objectifs du programme tout en améliorant la connaissance et la simulation des processus de transport sédimentaire dans toute leur complexité spatiale et temporelle.

La grille de calcul est irrégulière, elle présente une résolution fine dans les secteurs sensibles (chenaux et vasières) et beaucoup plus grossière vers le large. Les versions bidimensionnelles et tridimensionnelles sont appliquées sur deux maillages différents : un maillage dit « fin » (fig. E2a) et un maillage dit « grossier » (fig. E2b). Les mailles dans la zone des digues et vasières sont de l'ordre de 200 à 500 m dans le maillage fin et de l'ordre de 350 m à un kilomètre dans le maillage grossier. Les dimensions des mailles s'agrandissent en s'éloignant vers l'aval jusqu'à des valeurs de quatre kilomètres. La discrétisation longitudinale de l'estuaire amont est variable selon les versions, avec des mailles de 2 ou de 4 km de long.

On peut noter que même le maillage dit « fin » est relativement grossier dans le secteur des digues et des vasières, malgré la variabilité spatiale de la bathymétrie et des processus hydrosédimentaires dans cette zone. Mais, étant donné l'objectif de simulation à moyen terme (cycle lunaire et plus), ce maillage résulte d'un compromis pour éviter des calculs trop longs et garder une qualité des résultats satisfaisante.

La dimension verticale dans le modèle tridimensionnel est discrétisée en couches horizontales de niveaux fixés (épaisseur des couches de l'ordre de deux mètres, sauf pour les niveaux les plus profonds).

Les modèles SAM utilisent des techniques de résolution numérique en différences finies. Les pas de temps sont de l'ordre de la minute (Cugier, 1999).

Conditions aux limites

Hydrodynamiques :

- en aval (limite marine), les hauteurs d'eau sont introduites sous la forme d'une marée réelle, calculées par recombinaison harmonique de l'onde de marée ;
- en amont (fleuve), le débit d'eau douce mesuré à Poses est introduit quotidiennement.

Transport multivariable :

- en aval, les concentrations de chaque variable entrant dans le domaine en flot sont données constantes, en supposant que la limite du modèle est suffisamment éloignée pour pouvoir faire une hypothèse de mélange homogène au-delà de la limite. Les études ont montré que cette condition n'est pas tout à fait bien remplie pour un certain nombre de variables, en particulier la salinité ;
- en amont, les concentrations arrivant par le fleuve sont soit données constantes, soit estimées à partir du débit, soit lues dans un fichier de mesures, soit encore issues des résultats d'un modèle amont, ceci en fonction des informations disponibles pour chaque variable.

Traitement de la masse turbide et constituants particuliers

La masse turbide est représentée par une ou deux classes de particules dont les vitesses de chute sont paramétrées en fonction de la concentration en matières en suspension et de la salinité (pour rendre compte des processus de floculation). Leurs ordres de grandeur sont :

- pour les particules dites « légères » de 0,01 mm/s en eau douce à 0,1 mm/s au maximum en eau salée ;
- pour les particules dites « lourdes » de 0,2 mm/s en eau douce à 1 mm/s au maximum.

Les échanges avec le sédiment (dépôt, remise en suspension) imposent de coupler au modèle de transport sédimentaire un module de gestion du fond qui remplit les fonctions suivantes :

- calcul du flux d'érosion en fonction de la disponibilité et de la rigidité du sédiment superficiel ;
- prise en compte des dépôts en fonction de la concentration des sédiments dans l'eau et de leurs vitesses de chute ;
- transferts d'éléments dissous liés aux érosions-dépôts ;
- prise en compte éventuelle des processus de consolidation (option de calcul : modèle de tassement, p. 14), permettant un suivi de la rigidité superficielle et générant des transferts d'eau interstitielle avec tous ses constituants ;
- échanges verticaux d'éléments dissous par diffusion dans l'eau interstitielle, au sein du sédiment et à l'interface.

Concrètement, le « sédiment modélisé » est constitué d'une juxtaposition de colonnes multicouches correspondant à chaque maille horizontale du modèle de transport dans l'eau. Chaque colonne de sédiment est en fait un modèle unidimensionnel vertical qui résout l'équation de conservation de la masse pour chaque élément dissous ou particulaire, de manière itérative. Le nombre de couches est variable dans le temps, une nouvelle couche étant créée lorsque l'épaisseur de la couche superficielle dépasse une certaine valeur (de l'ordre du millimètre).

Le modèle WAVEMUD : présentation technique

Même en zones relativement abritées comme les estuaires, la resuspension des sédiments cohésifs* est fortement influencée par la présence de vagues. Le modèle analytique multicouche WAVEMUD a été développé pour étudier les interactions houle-vase. Il résout pour chaque couche de vase les équations linéarisées de conservation de la masse et de la quantité de mouvement en milieu incompressible. La relation constitutive du sédiment est supposée de type viscoélastique. Les lois de comportement sont déduites en laboratoire par des tests rhéométriques*. Le comportement rhéologique* de la vase peut ainsi varier entre un comportement parfaitement élastique et un comportement visqueux.

WAVEMUD permet de caractériser la dispersion et l'amortissement d'ondes monochromatiques ; il permet également de

calculer des profils verticaux, dans l'eau et dans le sédiment, des vitesses et des contraintes générées. Il est donc possible de déduire l'anéantissement structurel de la vase et son éventuelle liquéfaction. La liquéfaction des vases est prise ici dans le sens d'une évolution rhéologique qui rend son comportement proche de celui d'un fluide visqueux.

Pour une onde d'amplitude et de période données, le modèle utilise les lois de comportement de la vase, qui sont déduites de mesures en laboratoire et qui permettent d'estimer :

- les déformations induites dans la vase ;
- les contraintes développées au sein de la vase ;
- les zones de déformation critique où la vase est altérée et éventuellement liquéfiée.

Le modèle WAVEMUD (voir ci-dessus) a été développé pour simuler les mouvements au sein de la couche de vase engendrés par l'action de la houle. Son objectif est d'indiquer les mécanismes capables d'expliquer les modes d'érosion en masse observés. WAVEMUD caractérise la propagation des vagues sur un fond non rigide et l'interaction dynamique entre le mouvement oscillatoire dans la colonne d'eau et la déformation de la vase. Le modèle permet ainsi d'indiquer sous quelles conditions d'agitation un fond vaseux peut subir des altérations et devenir par conséquent facilement mobilisable par les forçages hydrodynamiques.

Actuellement, le modèle WAVEMUD demeure un outil d'étude de processus dont la compréhension permettra dans le futur de prendre en compte ce phénomène dans une modélisation globale de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Seine.

Floculation : modèle unidimensionnel vertical

Laboratoire : Cergrene, école nationale des ponts et chaussées

Les particules les plus fines, particules d'argiles et colloïdes organiques notamment, sont si petites que leurs vitesses de chute sont presque nulles à l'échelle du temps de transit de l'eau au travers de l'estuaire. Ces particules très petites ont de grandes surfaces d'interaction avec l'eau et sont donc capables de transporter des quantités importantes de produits, éventuellement polluants, adsorbés.

Dans certaines conditions, et notamment en présence de matières organiques qui joueront un rôle de liant, ces particules très fines sont capables d'interagir pour s'agréger et former des floccs. Une fois agrégées, et bien que certains floccs gorgés d'eau soient très peu denses, les particules fines

Modèle Floculation : présentation technique

Les particules sont séparées en plusieurs classes, regroupant les particules de même masse. Pour chacune de ces classes, une équation mathématique est écrite pour décrire l'évolution du nombre de particules de chaque classe, compte tenu des phénomènes de floculation et de défloculation (fig. E3). Plusieurs mécanismes peuvent agir simultanément. L'intensité des différents processus de floculation (sédimentation différentielle, turbulence...) ou de défloculation (turbulence, cisaillement...) est caractérisée par des paramètres. Certains sont bien connus et dépendent de la turbulence du milieu, de la taille et de la densité de chacune des particules impliquées dans la collision qui donnera lieu à floculation. L'efficacité des collisions est un paramètre à caler. D'autres paramètres sont extrêmement mal connus, tels que celui qui caractérise la distribution de taille des petites particules formées par l'éclatement d'un plus gros flocc. On fait l'hypothèse simplificatrice que les particules peuvent être brisées dès qu'elles dépassent la taille des plus petits tourbillons turbulents et on se donne la vitesse à laquelle elles se brisent.

Seules des particules élémentaires sont supposées être formées par l'éclatement d'un flocc.

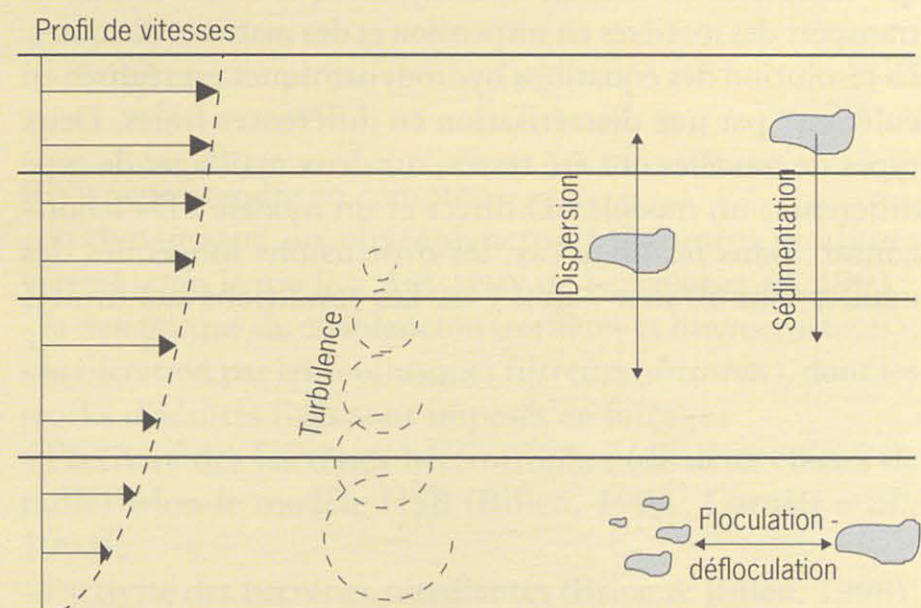


Figure E3 - Représentation schématique des processus qui agissent sur les particules dans la colonne d'eau.

Chapitre III

Modèles de processus physiques

Les « modèles de processus » physiques sont des modèles qui ont été développés pour étudier des phénomènes physiques particuliers, qui ne sont parfois pas encore intégrés directement dans les modèles de transport. Il peut s'agir de processus qui méritaient des études spécifiques pour vérifier une hypothèse ou bien de processus qui sont étudiés sur des échelles spatio-temporelles différentes, ou encore de processus mal connus qui nécessitent des modélisations plus fines ou originales.

HISWA : Hindcast Shallow Water Waves

Laboratoire : Ifremer, département Del/Écologie côtière

Les bancs peu profonds et les vasières à l'embouchure de la Seine sont susceptibles d'être remaniés car ils sont exposés aux vents et aux agitations provenant des secteurs ouest et sud-ouest ; ces secteurs correspondent aux conditions météorologiques les plus fréquentes. La caractérisation des agitations à l'embouchure de l'estuaire est donc essentielle si l'on cherche à décrire les variations des structures sédimentaires pour, à terme, reconstituer le bilan sédimentaire dans l'estuaire de la Seine. Cette caractérisation peut être menée sur la base des données statistiques existantes ou d'après des modèles numériques capables de propager la houle dans le secteur de l'embouchure. C'est dans ce cadre que le modèle HISWA est utilisé dans le programme Seine-Aval.

Le modèle HISWA (voir ci-dessous) est un modèle numérique développé et commercialisé par l'université technique de Delft (Pays-Bas). Il permet d'obtenir des estimations réalistes des caractéristiques de l'agitation (houle et clapot) dans les zones côtières et dans les estuaires pour des conditions stationnaires de vent et de courant.

HISWA utilise les résultats des modèles hydrodynamiques dans la zone (estuaire aval de la Seine : SAM-2DH) pour connaître les profondeurs et les courants de marée en tout point. Les calculs sont réalisés toutes les vingt minutes, en supposant que, pendant ces périodes de temps, l'hypothèse de stationnarité est admissible.

WAVEMUD : modèle de liquéfaction des vases

Laboratoire : Ifremer, département Del/Écologie côtière

Les observations réalisées dans l'estuaire montrent que l'action érosive des vagues sur les zones intertidales concerne parfois des quantités de matière importantes. Cette érosion ne peut être expliquée seulement par le frottement exercé sur le fond qui arracherait de manière plus ou moins continue les particules à la surface du sédiment. Des processus d'érosion en masse ont été observés, avec des couches de vase rapidement entraînées par les mouvements de la colonne d'eau, soit en état liquéfié, soit en blocs de vase consolidée appelés « galets mous ».

Modèle HISWA : présentation technique

Partant de conditions d'agitation connues en zone plus profonde, HISWA modélise la propagation et les transformations que subissent les vagues dans leurs parcours du large jusqu'au rivage. HISWA simule de manière intégrée les processus tels que :

- la réfraction due aux variations de la profondeur et des courants ;
- la génération par le vent ;
- le déferlement ;
- la dissipation par frottement près du fond.

Le modèle HISWA (Holthuijsen *et al.*, 1989) est un modèle de réfraction, spectral et semi-paramétrique. Il permet d'obtenir en tout point d'un maillage régulier les variables décrivant habituellement un état d'agitation : hauteurs significatives, vitesses orbitales, périodes moyennes, directions de propagation...

Aux limites ouvertes sur le large, les conditions d'agitation doivent être imposées ou déduites par ailleurs. Dans l'application de HISWA à l'estuaire de la Seine, ces conditions

aux limites sont déduites des données de vent car, à l'embouchure de l'estuaire, les agitations sont générées principalement par le vent soufflant en baie de Seine. À l'intérieur du domaine d'étude, l'utilisation de HISWA suppose une connaissance des profondeurs et des courants en tout point. Cette information peut provenir aisément des sorties des modèles de marée qui simulent la hauteur d'eau et les vitesses des courants.

La limitation la plus importante du modèle HISWA est sa stationnarité : ses résultats sont obtenus pour des conditions stationnaires de vent et de courant. Or, dans l'estuaire de la Seine, le vent et la marée changent, ce qui induit des variations dans la propagation et la transformation des vagues dans l'estuaire. Afin de modéliser l'évolution temporelle de l'état d'agitation, plusieurs calculs sont réalisés où les conditions de vent et de marée sont actualisées. Ces calculs sont réalisés toutes les vingt minutes car cela correspond à l'échelle de temps pendant laquelle les résultats obtenus ne sont pas significativement modifiés.

Chapitre IV

Modèles de processus chimiques, biologiques et biochimiques

Les modèles de processus chimiques, biologiques et biochimiques correspondent à des modèles relevant de disciplines différentes de l'hydrodynamique et du transport dissous et particulaire. Ils décrivent les processus qui interviennent dans l'évolution de la qualité de l'eau et de la matière vivante (poisson...). Ils sont destinés pour la plupart à être couplés à plus ou moins long terme à des modèles de transport pour l'étude du comportement de l'écosystème.

Processus microbiologiques : modèle RIVE

Laboratoires : Université Pierre et Marie Curie, laboratoire CNRS, UMR Sisyphe 7619
- Université libre de Bruxelles, groupe de microbiologie des milieux aquatiques

Les progrès récents de l'écologie microbienne ont permis de montrer que les processus (micro)biologiques qui régissent le fonctionnement d'écosystèmes aquatiques sont les mêmes à travers tout le *continuum* d'écosystèmes qui se succèdent des petits ruisseaux amont aux estuaires. Un seul et même modèle (RIVE : voir fig. 5 et ci-dessous) représentant la cinétique* de ces processus peut donc être utilisé pour le réseau hydrographique amont et pour l'ensemble du domaine estuarien. Les modèles mis au point dans Seine-Aval, comme ceux utilisés dans le programme Piren-Seine, utilisent la formulation du modèle RIVE.

Le système biologique et la qualité de l'eau y sont décrits (fig. 5) par la concentration en oxygène (O_2), en nutriments (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , phosphore adsorbé (AP), SiO_2), en matières en suspension (SM) et en carbone organique dissous et particulaire (3 classes de biodégradabilité (HD1, 2, 3; HP1,

2, 3), par la biomasse de deux espèces d'algues (diatomées (DIA) et chlorophycées (GRA), de deux types d'organismes zooplanctoniques (ZOO; rotifères à temps de génération court et microcrustacés à temps de génération lent), de deux types de bactéries hétérotrophes* (petites bactéries autochtones (Bp) et grandes bactéries allochtones (Bg) ainsi que des bactéries nitrifiantes* (NIT: nitrosantes et nitratantes).

Dans le cadre du programme Seine-Aval, le modèle RIVE a été couplé avec les deux modèles de transport multivariable : MODESTE et SAM (1D et 2D).

Dans le cas de SAM + RIVE, certaines concentrations à la limite amont (Poses) sont directement issues de simulations utilisant le modèle PROSE, développé dans le cadre du programme Piren-Seine. Ce modèle hydrodynamique, couvrant le fleuve Seine de Montereau à Poses, est couplé à RIVE pour décrire les processus biologiques dans cette zone.

Processus chimiques

Modélisation du manganèse

Laboratoire : Université de Lille, laboratoire de chimie analytique et marine, UPRES-A 8013 Elico

Le comportement du manganèse est étudié dans l'estuaire de la Seine en tant que traceur d'origine et de processus géochimiques (conditions redox). De plus, le manganèse sous forme particulaire peut être un support qui a une affinité non négligeable pour certains contaminants métalliques; il peut donc représenter un élément explicatif du devenir de certains contaminants. Des recherches spécifiques pour tenter sa modélisation ont donc été entreprises.

Modèle RIVE : présentation technique

Le modèle RIVE est la représentation en équations des principaux processus biologiques qui affectent le fonctionnement écologique des écosystèmes aquatiques. Il résume les connaissances d'écologie microbienne acquises durant les 15 dernières années. La figure 5 résume les principales variables d'état prises en compte et les interactions considérées entre ces variables. Le modèle RIVE exprime ces interactions sous forme d'une expression cinétique. La forme de ces expressions et la valeur des paramètres utilisés sont fixées *a priori* à partir d'observations ou d'expérimentations de terrain ou de laboratoire; ils ne font donc l'objet d'aucune procédure de calage.

RIVE peut prendre en compte :

- la dynamique du phytoplancton (diatomées et algues vertes) selon le modèle AQUAPHY de Lancelot *et al.*, 1991;
- la dynamique du zooplancton (rotifères et microcrustacés);
- la filtration par les mollusques filtreurs (*dreissènes*), dont les stocks d'adultes fixés sont imposés en forçage;
- l'activité des bactéries hétérotrophes (de deux classes de taille) selon le modèle HSB (Billen, 1992; Garnier *et al.*, 1992);
- l'activité des bactéries nitrifiantes (Brion & Billen, 1998);
- la minéralisation benthique (Billen *et al.*, 1989).

acquièrent des vitesses de chute plus élevées et sont donc susceptibles de sédimenter au cours de leur transit dans l'estuaire ou au cours des cycles de marée. La floculation favorise donc le stockage des polluants au sein de dépôts dans l'estuaire ; elle influence également le déplacement des particules dans le bouchon vaseux.

La floculation est un processus physique difficile à modéliser en détail à l'échelle de tout un estuaire. En effet, la quantité d'information à simuler est extrêmement importante si on veut accéder aux spectres granulométriques des floes en tout point de l'estuaire. De plus, si les mécanismes de floculation sont relativement bien connus, ceux de la défloculation n'ont pas encore été clairement identifiés. Dans le cadre d'une modélisation hydrosédimentaire globale à l'échelle de l'estuaire, il est nécessaire de trouver des formulations simplifiées qui intègrent l'effet de la floculation sur la sédimentation des particules.

Un modèle à une seule dimension verticale (voir p. 13) a été utilisé pour simuler l'effet des caractéristiques physiques de l'écoulement (turbulence, concentration en suspensions...) sur la taille des floes et donc sur leur vitesse de chute. Il a permis de valider les relations empiriques utilisées dans les modèles globaux de l'estuaire.

Tassement : module intégré en option dans SAM

Laboratoire : Ifremer, département Del/Écologie côtière

La remise en suspension des sédiments vaseux dépend de leur état de consolidation qui varie au gré des dépôts et érosions successifs et en fonction des processus de tassement. Ainsi, des sédiments déposés à l'étable de basse mer en vive-eau repartiront plus facilement lors du courant de flot qui suit que des matériaux qui auront séjourné sur le fond pendant toute une période de morte-eau. Il en va de même

pour l'action érosive des vagues. La prise en compte des phénomènes de tassement est donc importante pour un suivi continu des conditions de remaniement des sédiments et, en particulier, pour une gestion à moyen ou long terme des stocks sédimentaires et des contaminants associés.

Le modèle de tassement intégré dans les modèles hydrosédimentaires SAM résout la conservation de la masse de sédiment (obtenue en sommant sur toutes les classes de particules considérées) pour chaque couche de sédiment. La résolution numérique est compatible avec une très haute résolution verticale (couches d'épaisseur variable, de l'ordre du millimètre) et des pas de temps raisonnables. Le tassement est calculé toutes les 5 ou 10 minutes.

MOFEA : modèle fin estuaire amont

Laboratoire : Université du Havre, laboratoire de mécanique

Parallèlement aux modèles spatialisés généraux, un troisième modèle de transport dissous et particulaire a été développé dans le cadre du programme. Mais, contrairement à SAM et à MODESTE, il n'étudie pas le comportement de l'estuaire dans son ensemble. Son échelle spatiale est beaucoup plus fine (fig. 4, p. 7) et son objectif est de caractériser les variations de petite échelle dans un secteur donné, tel qu'un méandre. En effet, ces variations ne sont pas traitées par les modèles de transport à l'échelle de l'estuaire.

Le modèle MOFEA (voir ci-dessous) est un modèle tridimensionnel. Il est prévu pour fonctionner sur des laps de temps courts (flot - jusant) et sur des domaines restreints, tels que des méandres. Il permet d'obtenir les profils de vitesse tridimensionnels de l'écoulement ainsi que les trajectoires des particules en suspension.

Il n'y a pas actuellement d'interaction ni de couplage entre ce modèle fin et les modèles de plus grande échelle.

Modèle MOFEA : présentation technique

Le modèle MOFEA est un modèle de transport multivariable qui comprend un modèle hydrodynamique et un modèle de transport des matières en suspension et des matières dissoutes. La résolution des équations hydrodynamiques est réalisée en eulérien* par une discrétisation en différences finies. Deux types de modèles ont été testés, sur deux maillages de type différents : un modèle 3D direct et un modèle 2D+1 horizontal. Dans les deux cas, les dimensions moyennes des mailles sont 50 m x 7 m x 1 m. Les conditions aux limites

sont estimées en fonction des mesures de terrain effectuées par le laboratoire de géologie de Rouen.

Les équations de transport des particules en suspension sont résolues par une méthode lagrangienne utilisant les profils de vitesse instantanée calculés par les autres modèles. La vitesse de sédimentation dépend de la concentration afin de rendre compte du phénomène de floculation. La remise en suspension se fait par seuil en fonction du frottement sur le fond et de la concentration.

Modèle Moco : présentation technique

Le modèle MOCO traite l'adsorption des cations métalliques comme une formation de complexes avec des groupes fonctionnels de surface (hydroxyles). Les espèces dissoutes sont calculées à partir de la résolution des équilibres qui décrivent la complexation du métal avec différents ligands dissous (chlorures, hydroxydes, sulfates, composés organiques). Plusieurs types de sites de surface peuvent être pris en compte en fonction de leur affinité pour le cation métallique. La réaction est supposée être instantanément à l'équilibre et totalement réversible. Les réactions pouvant être prises en compte par MOCO, appliqué ici au cadmium (fig. 6), sont présentées dans le fascicule « Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire ».

Les équations chimiques, après traitement, s'écrivent sous la forme d'un système d'équations non linéaires qui traduisent les bilans de masse, les bilans du nombre total de sites et des charges de surface. Les effets électrostatiques de la charge de surface sont estimés par le modèle de Gouy-Chapman.

Une version plus opérationnelle du modèle MOCO a été appliquée et améliorée en fonction des expériences réalisées. Son objectif est de calculer la spéciation du cadmium à partir de données évaluées sur le terrain (MES, salinité, pH) et de paramètres issus non plus de la bibliographie mais de mesures directes sur les particules de la Seine. En effet, la distinction entre plusieurs types de surface est intéressante en recherche, mais elle est difficilement applicable de façon opérationnelle puisque seule la mesure globale du matériel en suspension est connue. De même, le modèle de transport sédimentaire actuel ne distingue les différentes fractions particulaires qu'en fonction de leurs vitesses de chute et non de leurs « capacités d'adsorption », par exemple. On fait donc l'hypothèse que les capacités d'adsorption des particules sont homogènes tout le long de l'estuaire. Cette hypothèse est vérifiée par des mesures en laboratoire qui permettent d'estimer la variabilité des propriétés de surface des particules prélevées dans l'estuaire.

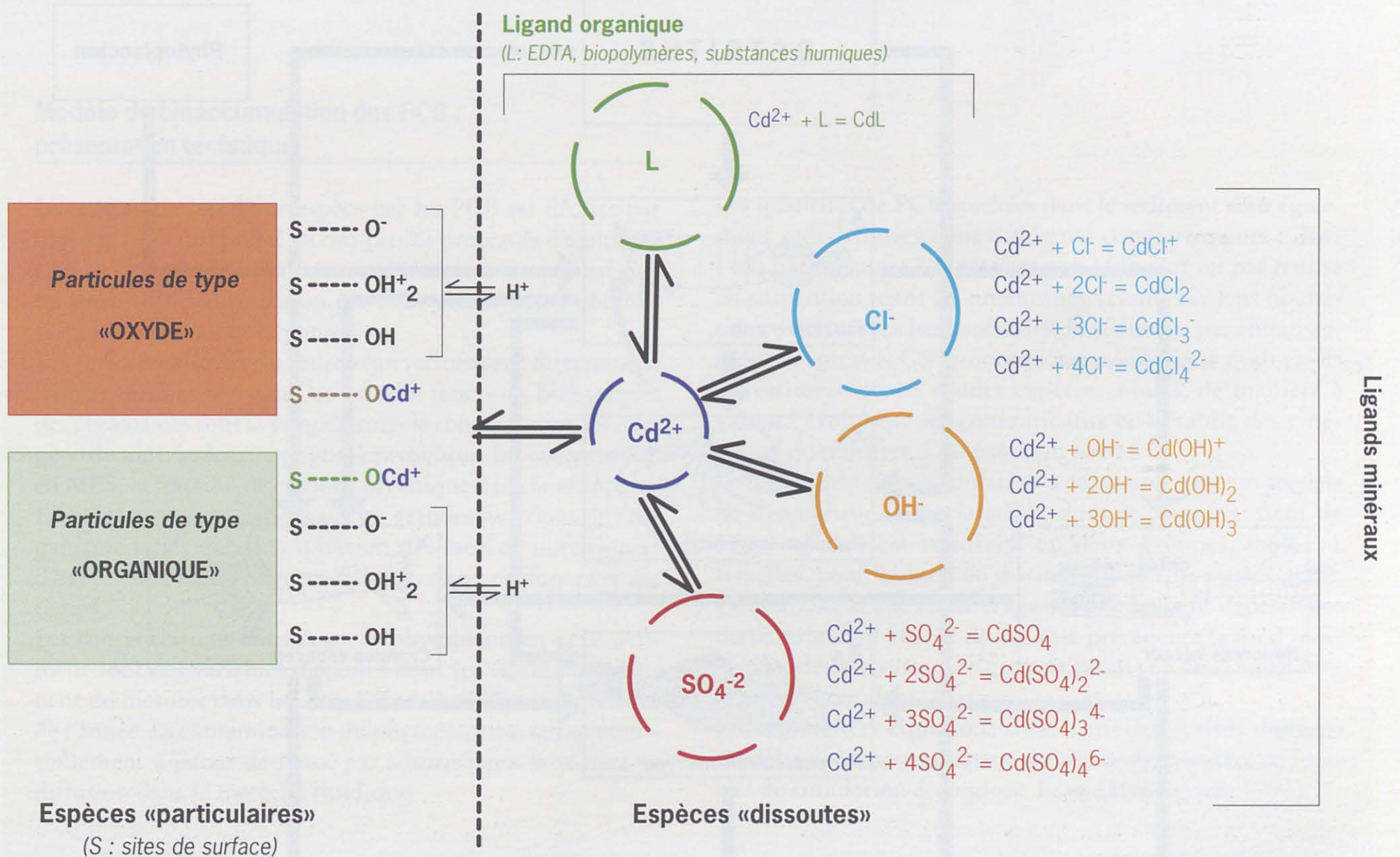


Figure 6 - Représentation des différentes espèces de cadmium prises en compte par le modèle Moco.

L'objectif du modèle de bioaccumulation des PCB, en reliant les concentrations dans les organismes vivants à celles dans l'eau, est de définir les principales « voies » de contamination des organismes (à partir de l'eau ou à partir de la nourriture) et les variables (chimiques, biologiques ou environnementales) qui interviennent dans le processus de contamination. Un tel outil prédictif peut être utilisé pour tester l'effet de réduction des apports de contaminants, en particulier pour évaluer les temps de demi-décontamination aux divers niveaux trophiques. Il considère la baie de Seine dans son ensemble, en reliant une concentration moyenne en PCB dans le milieu avec les concentrations dans les organismes vivants.

Un premier modèle de bioaccumulation des PCB (voir p. 19) a été réalisé dans le réseau trophique simplifié du bar (*Dicentrarchus labrax*), en régime permanent. Ce réseau trophique présente huit compartiments dont les relations sont décrites sur la figure 7. Il a été défini à partir de l'étude du régime alimentaire du bar (Bessineton & Simon, 1996) et des espèces intermédiaires (Mouny & Dauvin, 1996), en ayant déterminé également les niveaux de contamination dans chacun des niveaux trophiques.

Un modèle dynamique de bioaccumulation des PCB dans le même réseau a ensuite été réalisé pour prendre en compte les variations saisonnières (température, oxygène dissous, biomasse phytoplanctonique). Par ailleurs, ce modèle permet de distinguer les mâles des femelles (pour les bars) et prend en compte les pertes de contaminants lors de la ponte.

Enfin, pour définir les classes d'âge de l'espèce cible qui sont les plus sensibles à la contamination, le modèle de contamination a été couplé à un modèle de dynamique de population du bar. Cette dernière version permet de réaliser différentes simulations afin d'évaluer l'impact d'une réduction ou, au contraire, d'une augmentation des apports en contaminants sur les différentes classes d'âge de l'espèce cible.

Dans le cadre du programme Seine-Aval, ces modèles de processus n'ont pas été couplés à des modèles de transport qui pourraient leur fournir des informations sur l'évolution du milieu et des concentrations en PCB dans l'eau. Cette interaction est envisagée dans les prochaines années, ainsi que le couplage avec un modèle de production primaire de manière à mieux appréhender les processus de contamination du phytoplancton.

Modèle de bioaccumulation des PCB : présentation technique

La contamination d'une espèce par les PCB est décrite par une équation qui prend en compte les processus d'assimilation à partir de l'eau et à partir de la nourriture, ainsi que les processus d'élimination par l'excrétion, la métabolisation, la croissance et la ponte.

Les caractéristiques du milieu qui influencent directement les mécanismes régissant les grandes fonctions biologiques des organismes sont la température, la concentration en oxygène dissous, la densité phytoplanctonique, la concentration en MES, la fraction de carbone organique dans le sédiment. Elles agissent directement sur les grandes fonctions de l'organisme telles que la respiration, les taux de nutrition et d'excrétion, la croissance. Elles varient en fonction du temps.

Les concentrations dans l'eau, le phytoplancton et le sédiment sont des variables forçantes dont les valeurs proviennent de mesures dans la zone d'étude à différentes périodes de l'année. La contamination du phytoplancton se fait essentiellement à partir de l'eau, par adsorption à la surface et diffusion dans le matériel lipidique.

Les quantités de PCB stockées dans le sédiment sont également redistribuées dans différents compartiments : dans l'eau par échanges à l'interface eau-sédiment ou par remise en suspension, dans les organismes vivants *via* leur nourriture, dans les couches profondes du sédiment par enfouissement progressif. Ces processus sont difficiles à évaluer, ils nécessiteraient des études expérimentales, de manière à suivre l'évolution des contaminants et à établir des cinétiques de transfert d'un état à un autre.

Le modèle de bioaccumulation a été couplé avec un modèle de dynamique de population, dont le compartiment de l'espèce cible est subdivisé en deux groupes, mâles et femelles, pour lesquels on distingue plusieurs classes d'âge. La biomasse d'une classe d'âge est directement dépendante du recrutement venant de la classe précédente (gain d'individus), de la croissance (gain de poids) et de la mortalité (perte d'individus).

Les différentes équations différentielles écrites dans les modèles de bioaccumulation ont été intégrées grâce au logiciel de simulation écologique ELISE (Ménésguen, 1991).

Appliqué au cadmium (fig. 6), ce modèle est accompagné de recherches et d'expérimentations en laboratoire et sur le terrain pour vérifier les hypothèses du modèle et quantifier les caractéristiques d'adsorption des particules dans l'estuaire.

MOCO est utilisé de plusieurs manières :

- soit à partir de mesures en laboratoire, utilisant le marquage radioactif (^{109}Cd) sur des particules prélevées dans l'estuaire afin d'évaluer la constante de complexation globale, représentative des particules de la Seine;
- soit à partir de mesures *in situ* de cadmium total dans l'eau, associées à des mesures de salinité, matières en suspension, pH, sulfates. Le modèle calcule le partage du cadmium entre ses phases dissoutes et particulaires et le compare aux valeurs effectivement mesurées sur le terrain dans un certain nombre de conditions (différents estuaires et différentes saisons);
- soit couplé avec les modèles de transport multivariable (SAM), ce qui permet de suivre le transport et les échanges du cadmium dissous et particulaire dans tout l'estuaire et au cours du temps.

Processus biologiques de bioaccumulation de polluants : cas des PCB

Laboratoire : Ifremer, département Del/Écologie côtière

La bioaccumulation désigne la capacité des organismes aquatiques à concentrer et à accumuler les substances chimiques à des concentrations bien supérieures à celles où elles sont présentes dans l'eau qui les environne. Ce processus revêt une grande importance dans les études sur le niveau, le devenir et les effets des contaminants.

S'agissant de composés présumés toxiques comme les PCB*, la bioaccumulation conditionne les effets à long terme sur les organismes de rang trophique* supérieur. En général, les concentrations présentes dans l'eau de mer restent en dessous des seuils de toxicité aiguë. Toutefois, en raison de la bioaccumulation, les quantités de PCB stockées dans les graisses peuvent, dans les situations où les organismes ont recours à ces réserves d'énergie, atteindre des concentrations susceptibles de perturber des fonctions vitales.

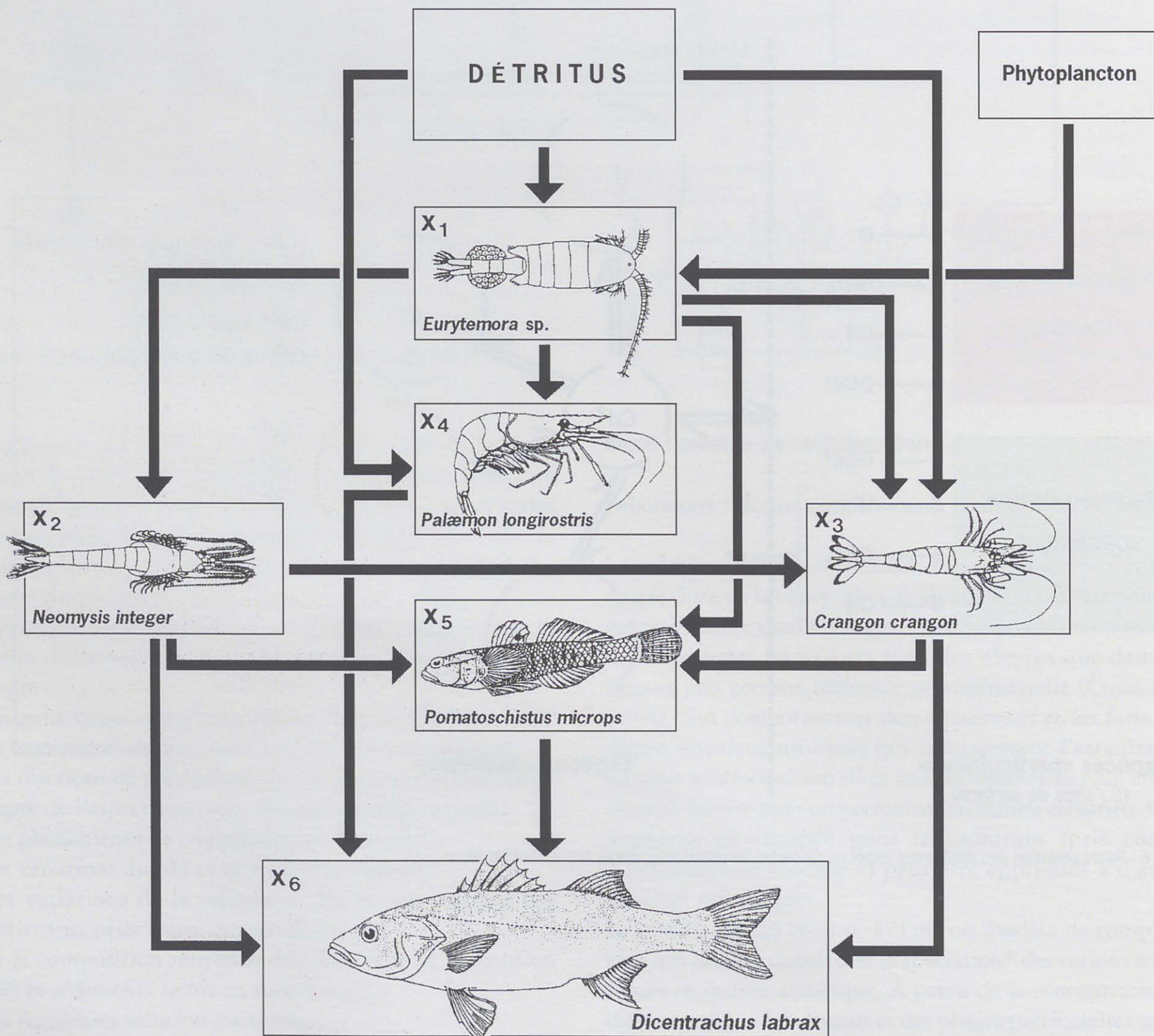


Figure 7 - Réseau trophique du bar.

Les animations dans le temps et les évolutions de certaines variables en un point apportent des informations parlantes sur leurs variations en amplitude et en période (exemple fig. 11). Les effets respectifs des cycles de marée, des cycles lunaires* et des variations saisonnières sont plus aisément observables dans leur ensemble ;

- la comparaison des résultats avec des mesures sur le terrain introduit parfois une approche plus complète pour mieux comprendre les variations observées. Le modèle, en intégrant le transport des éléments dissous et des particules, peut faire la part entre les processus uniquement dynamiques et les processus chimiques ou biochimiques ;

- l'étude des effets de certains forçages (débit du fleuve, vent, température, marée, apports...) sur le comportement de variables chimiques ou biologiques est également réalisable, pourvu que le modèle soit suffisamment validé. L'utilisateur de l'outil est alors maître des données externes au modèle et peut donc examiner les conséquences de certaines évolutions naturelles ou anthropiques.

Un modèle couplé, qui intègre plusieurs processus relevant de disciplines différentes, donne des résultats complexes, qu'il est parfois difficile d'interpréter. Chaque élément apporte des incertitudes sur les valeurs calculées à cause par exemple de paramètres mal connus. Les analyses de sensibilité sont utilisées pour étudier l'effet de ces incertitudes sur le comportement global de l'écosystème. Une hiérarchisation de l'importance des phénomènes agissant sur telle ou telle évolution observée est aussi possible.

La multiplicité des modèles couplés entraîne certaines contraintes mais offre la possibilité de répondre à différents objectifs. Outre les problèmes techniques dus au couplage proprement dit et à la compatibilité des codes de calcul, les contraintes dues à chaque discipline s'ajoutent et entraînent souvent des lourdeurs et des difficultés dans l'utilisation du modèle intégré.

La disponibilité de plusieurs modèles pouvant être couplés conduit à devoir choisir l'outil le plus cohérent et le plus adéquat pour répondre à la question posée. Tout en étant parfois perçu comme une contrainte, puisque cela suppose de bien connaître les outils et leurs limites d'application, c'est également un atout puisque, selon l'objectif, le modèle choisi peut être plus performant qu'un modèle unique. Il est d'ailleurs à l'heure actuelle impensable de vouloir répondre à toutes les questions qui se posent dans un estuaire tel que celui de la Seine avec un seul outil de calcul.

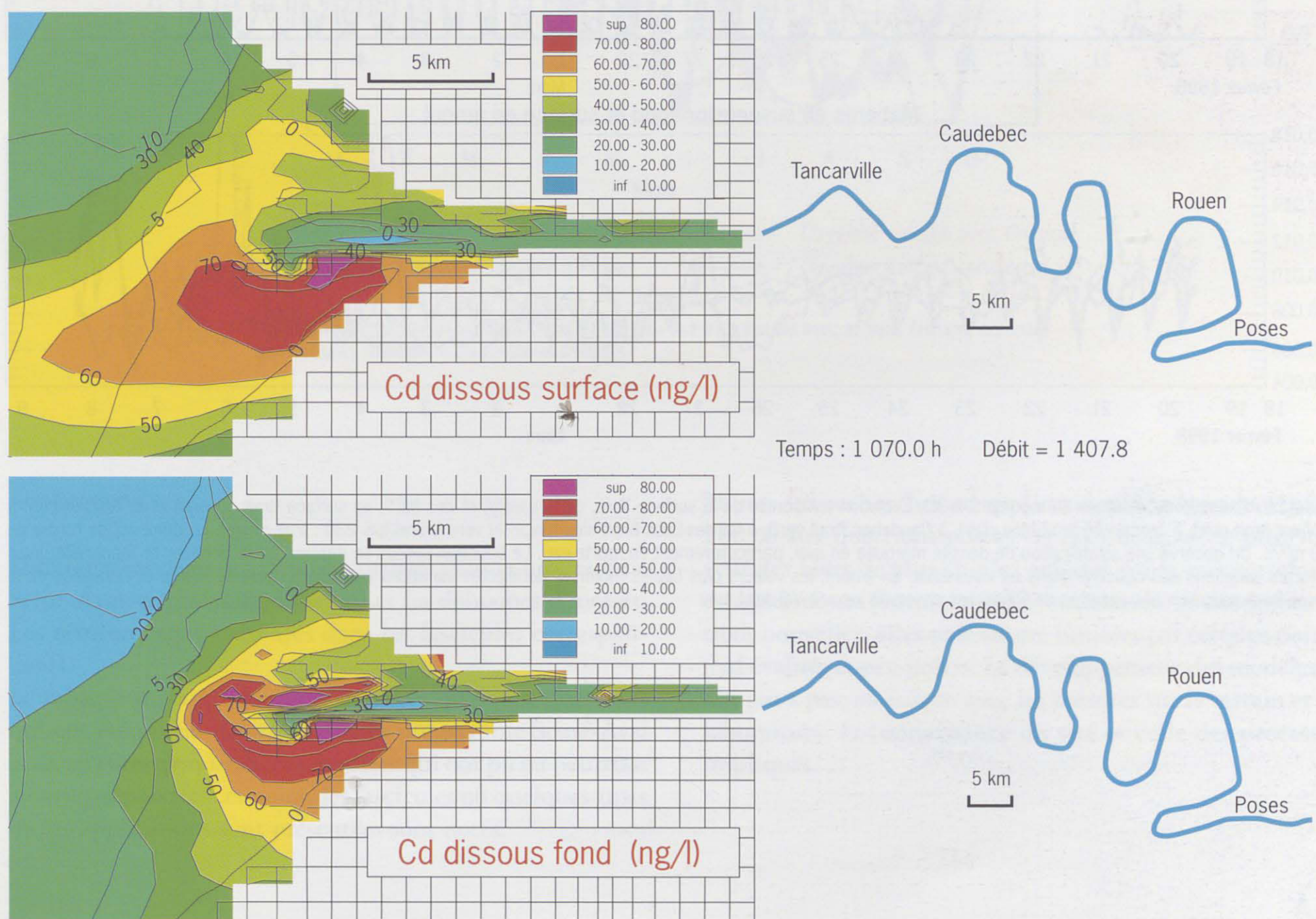


Figure 10 - Exemple de résultats du modèle SAM-3D en coupes horizontales pour le cadmium dissous en surface et au fond, à basse mer en crue.

Chapitre V

Couplage des modèles - Applications - Limites

Pour répondre à certains problèmes posés et pour simuler le comportement de l'écosystème dans son ensemble, certains de ces modèles ont été couplés. La figure 8 montre les interactions et liaisons qui ont été réalisées pendant le programme Seine-Aval. D'autres couplages sont prévus ou envisagés en fonction des objectifs et résultats de chacun.

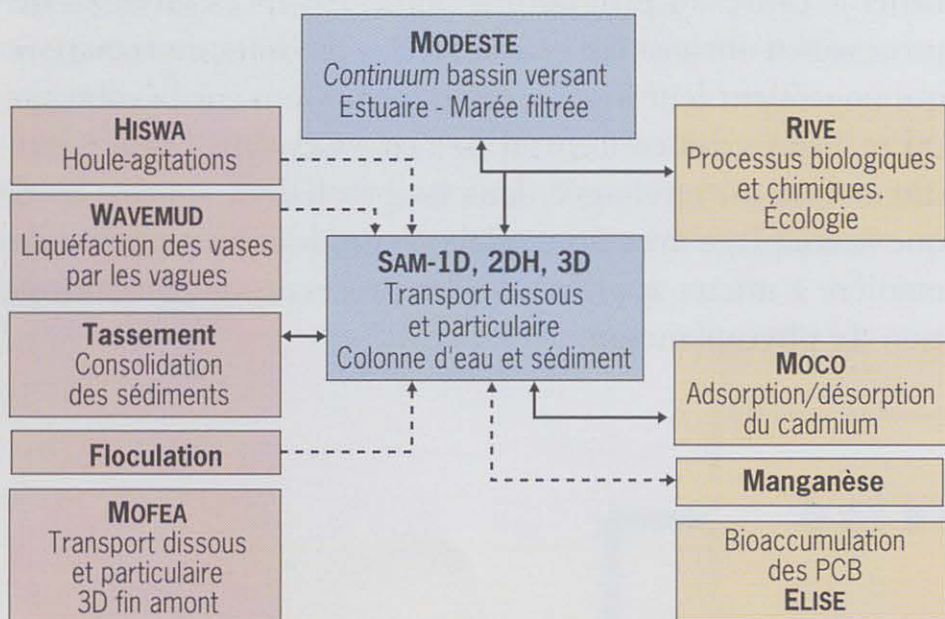
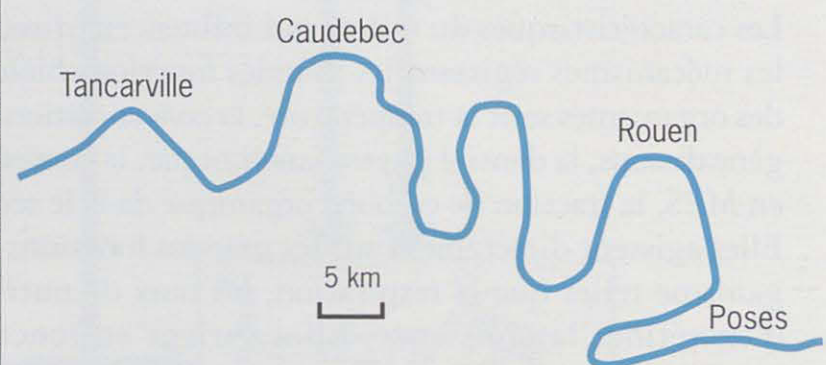
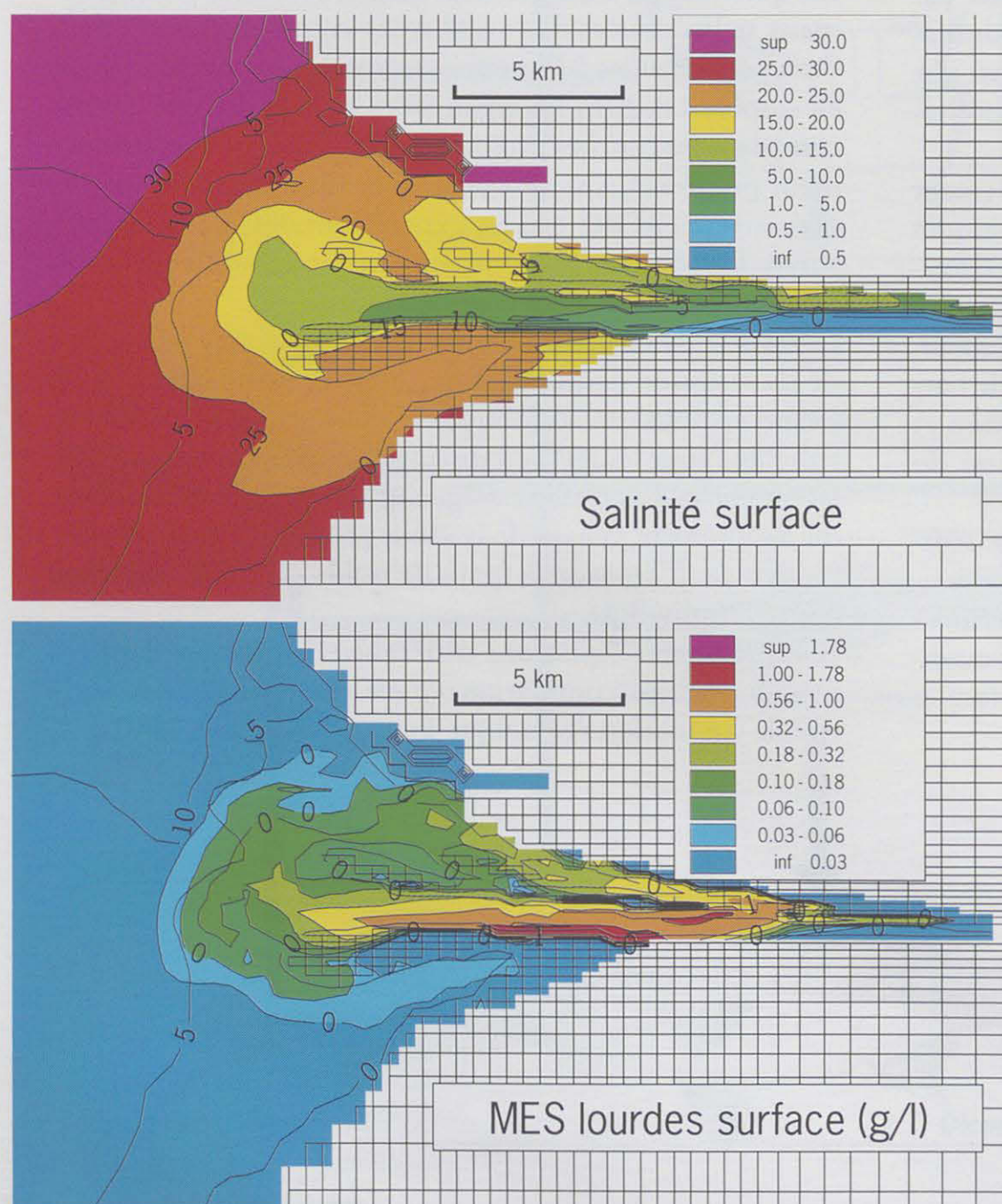


Figure 8 - Couplages et interactions entre les différents modèles développés dans Seine-Aval.

Le couplage des modèles de transport et des modèles de processus permet plusieurs analyses :

- l'intégration de différents processus par le couplage des modèles donne la possibilité d'étudier les interactions, les synergies et les conséquences de certains phénomènes d'ordre dynamique ou sédimentaire sur le comportement d'autres constituants de l'eau. Un exemple est présenté page 23. Certaines évolutions peuvent se manifester à des échelles de temps différentes de celles de chaque processus pris séparément. Par exemple, des temps de latence dus à des périodes de sédimentation dans des zones de dépôt à certaines périodes de l'année peuvent engendrer des réactions qui ne sont pas *a priori* prévisibles ;
- la visualisation des résultats du modèle donne la possibilité de suivre dans l'espace et dans le temps les variations des différents constituants de l'eau qui sont simulés. La « spatialisation » des phénomènes permet, d'une part, de mieux se rendre compte de leurs échelles et des zones de concentration, et, d'autre part, de repérer des comportements ou des régions singulières (exemples fig. 9 et 10).



Temps : 3 620.0 h Débit = 364.7

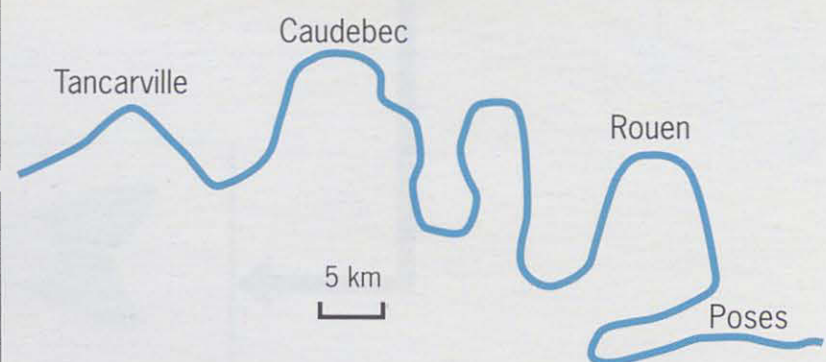


Figure 9 - Exemple de résultats du modèle SAM-3D en coupes horizontales. Salinité et matières en suspension en surface : tracés à basse mer en période de vives-eaux, par débit moyen - Maillage fin.

Importance du couplage MES/bactéries

Le couplage du modèle hydrosédimentaire SAM-1D au modèle biochimique RIVE a permis d'analyser précisément l'impact de différents forçages hydrodynamiques sur le bilan des espèces dissoutes (éléments nutritifs et oxygène).

Il apparaît au vu des observations que les bactéries, et également la matière organique, sont soumises à une dynamique particulière qui, outre le transport horizontal, inclut un transport vertical lié aux processus de sédimentation-érosion produits par la marée. Les migrations verticales des bactéries sont alors à l'origine d'une consommation d'oxygène cyclique à même échelle.

L'utilisation du modèle a permis de conduire une étude de sensibilité vis-à-vis des processus de sédimentation-érosion auxquels sont soumises les bactéries. Une situation prenant en compte l'érosion a été comparée à une situation sans érosion (fig. E4). Dans le premier cas, les déficits en oxygène sont correctement estimés à Rouen, La Bouille et Caudebec, contrairement à la deuxième situation où la consommation d'oxygène est largement insuffisante. Un résultat

similaire est obtenu si l'on fait varier les vitesses de chute des microorganismes. Ainsi, des processus jouant à petite échelle (sédimentation-érosion à chaque cycle de marée) ont une influence notable sur la dynamique d'ensemble du système à grande échelle.

L'amplitude plus ou moins forte des marées provoque également des remises en suspension importantes à certains moments du cycle lunaire, en des endroits où des dépôts permanents se forment, notamment dans le secteur de Rouen. Ces pics de MES qui apparaissent dans la colonne d'eau sont alors transportés vers l'aval. Les concentrations observées en un point résultent donc de plusieurs facteurs, incluant une remise en suspension locale mais également une source de MES venant de l'amont, compliquant l'interprétation d'une mesure en un point donné. L'utilisation d'un modèle permet de reconstituer la chronique des événements qui ont pu dans le temps et dans l'espace conduire aux niveaux observés.

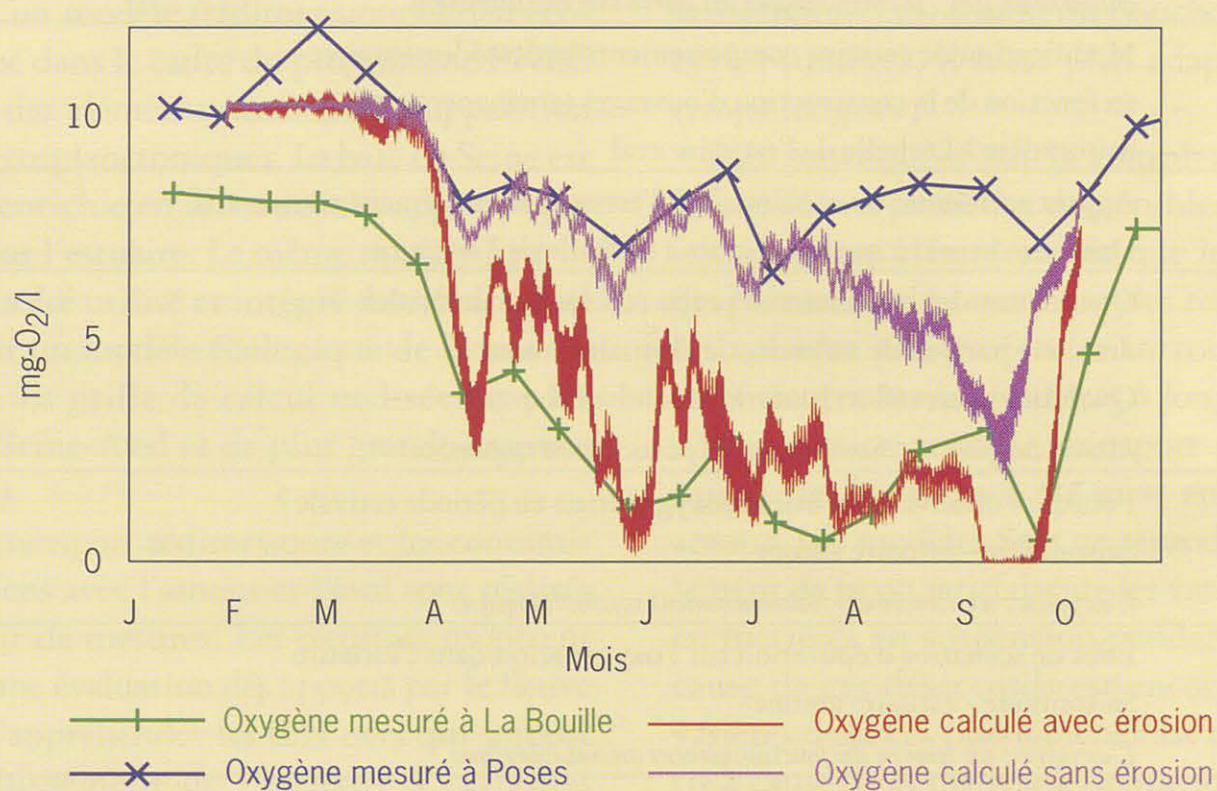


Figure E4 - Oxygène simulé par le modèle SAM-1D + RIVE à La Bouille avec et sans érosion, comparé aux mesures réalisées à La Bouille et à Poses.

Applications

Différents modèles ont donc été utilisés dans le programme Seine-Aval, selon les applications et les domaines d'intérêt. Les résultats sont présentés dans les fascicules correspondants.

Le tableau suivant liste pour exemple quelques questions qui ont été posées dans le cadre du programme Seine-Aval avec, en correspondance, les modèles qui ont pu ou pourront aider à y répondre. Les noms des fascicules où quelques-unes de ces applications sont présentées sont notés.

Toutes les recherches et applications ne répondent pas à 100 % aux questions posées. Si elles donnent le plus souvent des idées de plus en plus précises sur le comportement du système en fournissant des indications et des informations nouvelles, elles sont encore limitées par certains points mal évalués et peu précis. Le développement des modèles se fait pas à pas, en liaison avec les mesures sur le terrain et en laboratoire, la connaissance du site et celle des processus impliqués.

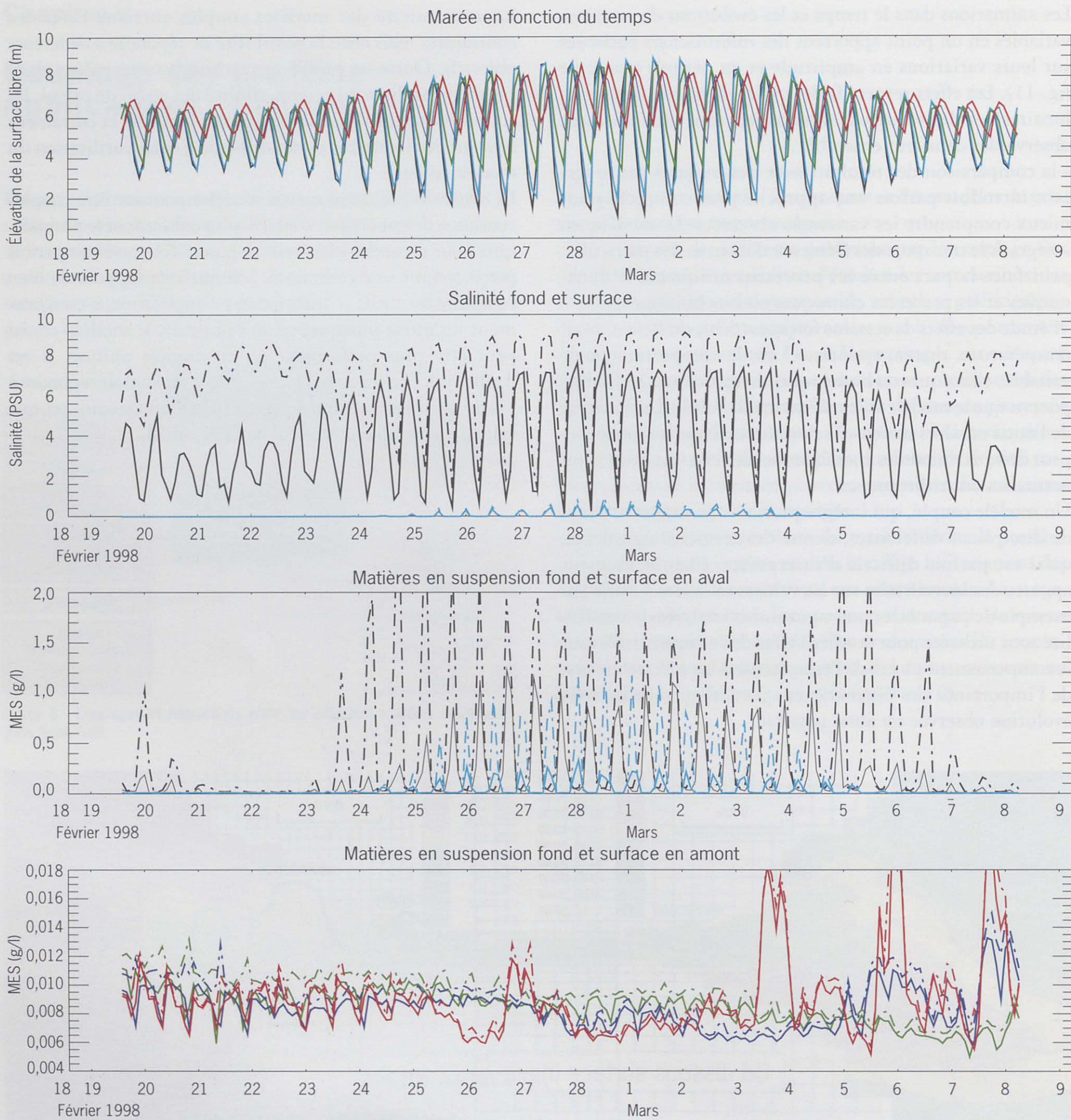


Figure 11 - Exemple de résultats du modèle SAM-3D. Évolution temporelle de la surface libre, de la salinité et des MES, en surface (trait continu) et au fond (tireté), à Honfleur (trait noir), à Tancarville (trait bleu clair), à Caudebec (trait vert), à Val-des-Leux (trait bleu foncé) et vers Oissel (pK 230 : trait rouge). Le débit est de l'ordre de 400 m³/s. On observe une stratification de densité marquée en aval, particulièrement en morte-eau. Le bouchon vaseux se déplace entre Honfleur et Tancarville, avec de fortes variations des concentrations en vives-eaux. En amont, les valeurs plus faibles montrent de légères variations pendant le cycle de marée et l'influence de la remise en suspension des vasières de Oissel est observée jusqu'à Val-des-Leux.

Couplage et liaisons amont-aval

Les modèles utilisés dans le programme Seine-Aval sont couplés entre eux pour intégrer plusieurs processus, mais ils peuvent également être couplés à d'autres modèles par l'intermédiaire des conditions aux limites. En effet, l'estuaire est un passage entre le fleuve amont et l'océan, et son écosystème dépend souvent des flux de matières qui rentrent par la limite amont et par la limite aval. Plus les connaissances sur ces flux (en quantité et en qualité) sont précises, plus le fonctionnement physique, chimique et microbiologique dans l'estuaire peut être précisément reproduit et compris. Par conséquent, lorsque cela est possible, les modèles du programme Seine-Aval sont ou seront connectés à des modèles développés dans le cadre d'autres programmes d'étude (Piren-Seine et PNEC-baie de Seine).

En ce qui concerne le fonctionnement microbiologique et les problèmes de désoxygénation dans l'estuaire, cette liaison entre l'amont et l'aval a été directement appliquée (voir MODESTE et RIVE développés dans le cadre du programme Piren-Seine, p. 8, 9 et 15 et figure E1).

Dans la baie de Seine, un modèle tridimensionnel de l'écosystème a été développé dans le cadre du programme PNEC afin d'étudier le cycle des éléments nutritifs et l'apparition de fortes biomasses phytoplanctoniques. La baie de Seine est en effet une zone très enrichie en sels nutritifs apportés par la Seine et transitant par l'estuaire. Le même modèle hydro-sédimentaire SAM-3D a été utilisé et intégré dans le logiciel ELISE-3D, pour obtenir un modèle écologique de la baie de Seine (Cugier, 1999). La grille de calcul utilisée est plus grossière que celle de Seine-Aval et de plus grande emprise vers l'aval (fig. 4, p. 7).

En ce qui concerne le transport sédimentaire et les contaminants chimiques, les liens avec l'amont et l'aval sont réalisés essentiellement à partir de mesures. Les résultats montrent l'importance d'une bonne évaluation des apports par le fleuve pour être en mesure d'appréhender les flux nets qui sortent de la baie et l'enrichissement de l'estuaire à certaines périodes de l'année.

Limites

Un certain nombre de difficultés ont été rencontrées dans le développement de ces modèles et leur couplage. Certaines n'ont pas été surmontées et conduisent à des résultats imparfaits ou limités dans leur champ d'application. Ces limites peuvent être de deux types :

- Soit imposées par les choix des modèles, leurs contraintes et les échelles spatio-temporelles :
 - le choix d'un maillage très fin, pour prendre en compte les fortes variations bathymétriques dans l'estuaire, entraînerait des pas de temps très petits pour maintenir la stabilité de la solution numérique. La stratégie de modélisation ne peut donc être la même lorsque l'objectif est de simuler des périodes de temps courtes (marée) ou des périodes de temps longues (saisons, *a fortiori* plusieurs années),

- la discrétisation spatiale des modèles utilisés ici résulte donc d'un compromis entre le besoin d'une résolution fine pour reproduire le mieux possible la dynamique des particules et la nécessité d'éviter des temps de calcul trop longs lorsque l'on ajoute des variables de qualité de l'eau et des processus biochimiques complexes. Comme tout compromis, il n'est pas toujours satisfaisant (exemple : les vasières grossièrement reproduites sans prise en compte des chenaux et des pentes variables),

- la limite aval choisie au départ pour la couverture des modèles dans la baie de Seine est placée trop près de l'estuaire. Les résultats, surtout pour les variables dissoutes conservatives (exemple : salinité en bordure de panache), restent sensibles aux conditions données à la limite,

- les échelles de temps des processus biochimiques et chimiques entraînent des exigences sur la réponse des modèles sur le long terme. Les processus qui entrent en jeu sont alors plus nombreux et plus difficiles à reproduire de façon exacte. Les incertitudes s'accumulent au cours du temps et provoquent parfois des comportements erronés. Par exemple, si le modèle bidimensionnel reproduit de façon satisfaisante l'évolution du bouchon vaseux sur un ou deux cycles lunaires, il n'est plus adapté pour des périodes de temps longues ;

- Soit provoquées par la complexité du milieu et par les informations partielles disponibles :

- les forçages aléatoires tels que les tempêtes et le passage des bateaux qui provoquent des remises en suspension dans les vasières peu profondes introduisent des incertitudes importantes sur les résultats à long terme,

- l'interaction entre le transport sédimentaire et la dynamique des bactéries a été mise en évidence dans l'estuaire amont. Les modèles SAM ne reproduisent pas encore actuellement de façon satisfaisante les variations des concentrations en matières en suspension pendant la période d'étiage. La cause de ces désaccords est encore incertaine. Le rôle des vasières dans ces phénomènes est difficile à simuler en partie à cause de la mauvaise définition de la bathymétrie dans ces zones,

- il existe un phénomène d'hystérésis* dans l'évolution des concentrations en particules qui arrivent par le fleuve. La relation que l'on utilise entre le débit et les concentrations pour évaluer le flux brut n'est en fait pas constante pendant les crues ; or, c'est pendant ces périodes que l'évolution dans l'estuaire est sensible à ces apports,

- la conceptualisation des processus chimiques pour les contaminants conduit au fur et à mesure du perfectionnement des modèles à faire intervenir des processus quasi microscopiques. Or, l'intégration de ces modèles de processus dans des modèles spatialisés pour simuler le comportement du contaminant à l'échelle de l'estuaire oblige au contraire à penser de façon plus globale et opérationnelle, en faisant intervenir des variables directement accessibles par la mesure sur le terrain ou par le calcul.

Tableau - Liste des applications réalisées ou projetées correspondant aux principales questions posées dans le cadre du programme Seine-Aval.

Questions qui ont été posées dans le programme Seine-Aval		Modèles utilisés
Type de question	Trajectoires d'un élément dissous dans l'estuaire	SAM-3D
Échelles de temps et d'espace	Plusieurs cycles de marée à l'échelle de l'estuaire	
Fascicule	<i>Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau</i>	
Type de question	Propagation de la houle dans la baie	HISWA
Échelles de temps et d'espace	Quelques heures - baie de Seine	
Fascicule	<i>Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau</i>	
Type de question	Devenir des particules arrivant par l'amont	SAM-3D
Échelles de temps et d'espace	Plusieurs mois à l'échelle de l'estuaire	+
Fascicule	<i>Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension</i>	Tassement
Type de question	Effet d'une tempête sur les vasières aval	HISWA, WAVEMUD
Échelles de temps et d'espace	Quelques jours dans l'estuaire aval	SAM-3D
Fascicule	<i>Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension</i>	+ Tassement
Type de question	Remise en suspension sous l'action des courants de marée	SAM
Échelles de temps et d'espace	Cycle lunaire dans l'estuaire	+
Fascicule	<i>Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension</i>	Tassement
Type de question	Comment se déplace le bouchon vaseux en fonction de la marée et du débit de la Seine ?	SAM
Échelles de temps et d'espace	Mensuelle - estuaire aval	+
Fascicule	<i>Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension</i>	Tassement
Type de question	Modification de certains comportements hydrosédimentaires en fonction de la construction d'ouvrages (aménagement)	SAM
Échelles de temps et d'espace	Saisonniers à l'échelle de l'estuaire aval	+
Fascicule		Tassement
Type de question	Apport accidentel ou continu dans l'estuaire d'un élément conservatif	SAM
Échelles de temps et d'espace	Quelques heures à quelques jours à l'échelle de l'estuaire	
Type de question	Quelles sont les trajectoires à petite échelle des particules dans une portion de méandre de l'estuaire amont ?	MOFEA
Échelles de temps et d'espace	Quelques heures (flot, jusant) - méandre en amont	
Fascicule	<i>Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension</i>	
Type de question	Pourquoi observe-t-on une désoxygénation en période estivale ?	MODESTE
Échelles de temps et d'espace	Saisonniers - estuaire amont	SAM
Fascicule	<i>L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique</i>	+ RIVE
Type de question	Effet de scénarios d'épuration sur l'oxygénation dans l'estuaire	MODESTE
Échelles de temps et d'espace	Saisonniers - estuaire amont	SAM
Fascicule	<i>L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique</i>	+ RIVE
Type de question	Spéciation du cadmium. Partage dissous-particulaire-espèce libre	MOCO
Échelles de temps et d'espace	Minute à l'échelle d'un prélèvement d'eau	
Fascicule	<i>Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire</i>	
Type de question	Effets des changements naturels et anthropiques sur les variations de concentrations des différentes espèces de cadmium	SAM
Échelles de temps et d'espace	Mensuelle à l'échelle de l'estuaire	+
Fascicule	<i>Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire</i>	MOCO
Type de question	Flux de cadmium sortant de l'estuaire	SAM
Échelles de temps et d'espace	Mensuelle à annuelle à l'échelle de l'estuaire	+
Fascicule	<i>Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire</i>	MOCO
Type de question	Bioaccumulation des PCB dans le réseau trophique	ELISE
Échelles de temps et d'espace	Pluriannuelle dans le réseau trophique	
Fascicule	<i>Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir</i>	

Annexe

Notions préliminaires sur les modèles mathématiques en océanographie côtière et estuarienne - Définitions de quelques termes

Un **modèle mathématique** est une représentation simplifiée d'un système qui peut être décrit par des équations mathématiques. Celles-ci sont dérivées des théories de la physique, de la chimie ou de la biologie. Les résultats obtenus après résolution de ces équations constituent une « simulation » du comportement du système.

Il existe toutes sortes de modèles selon le système que l'on veut reproduire. En océanographie côtière, les modèles s'intéressent aux masses d'eau, à leurs mouvements, à leur mélange et à leurs constituants (éléments nutritifs, oxygène, matériels organique et minéral, matière vivante, phytoplancton, zooplancton, poissons, produits chimiques, etc.). Le **système** à modéliser doit donc être défini tout d'abord de manière physique (lieu-temps) et il est ensuite caractérisé selon l'objectif et le problème posé en déterminant les variables (les quantités de certains éléments qui caractérisent l'eau ou qui sont dans l'eau) et les phénomènes qui doivent être simulés.

Des exemples

On s'intéresse à un estuaire et on veut simuler le comportement d'un rejet liquide qui introduit des contaminants dissous et particuliers dans le système. Les variables que l'on simulera seront les concentrations de ces polluants en plus des variables qui caractérisent le mouvement des masses d'eau et son mélange (courants, hauteurs d'eau, salinité).

Ou bien, on s'intéresse au processus de dégradation d'un polluant. Le système pourra être caractérisé par la concentration de ce polluant qui varie au cours du temps dans une masse d'eau donnée dont les mouvements sont ignorés (cela peut être dans un flacon au laboratoire).

Les phénomènes qui sont en jeu dans le comportement du système sont ensuite étudiés, puis écrits de manière mathématique. Leur mise en équation est basée sur des concepts qui correspondent à la compréhension du phénomène et à une vision plus ou moins simplificatrice pour le représenter.

Les modèles spatialisés (transport multivariable)

Les modèles de transport multivariable sont destinés au transport de plusieurs constituants de la masse d'eau, qui peuvent être dissous ou particuliers en suspension dans l'eau. Ces modèles doivent tenir compte du mouvement des masses d'eau dans lesquelles ces variables sont transportées ; c'est pourquoi ils sont constitués d'un modèle hydrodynamique et d'un modèle de transport.

• Le **modèle hydrodynamique** résout les équations de conservation de la quantité de mouvement et de conservation de la masse d'eau.

Les **équations de conservation de la quantité de mouvement** expriment que la variation de la quantité de mouvement d'un élément fluide est égale à la somme des forces qui s'exercent sur cet élément (forces dues à la pesanteur, force de Coriolis* provoquée par la rotation de la Terre, forces

induites par la marée, par le vent, par les différences de pression atmosphérique ou par les différences de densité des masses d'eau voisines, frottement...).

Les **équations de « conservation de la masse d'eau »** expriment que la masse d'eau ne disparaît ni ne se crée en se déplaçant.

Le modèle hydrodynamique calcule la hauteur d'eau et les courants en fonction du temps.

• Le **modèle de transport** résout les équations de conservation de la masse pour chaque variable dissoute ou en suspension dans l'eau. Ces équations sont également appelées équations d'advection/dispersion.

Les **équations de « conservation de la masse »** d'un produit (ou de sa quantité) expriment que la concentration de tout élément dans un volume d'eau et pendant une période de temps donnée varie en fonction de ce qui entre et de ce qui sort de ce volume pendant ce temps :

$$\begin{array}{l}
 \text{Masse [M1]} \\
 \text{d'un élément dans le volume V au temps } t + \Delta t \\
 = \\
 \text{Masse [M0]} \\
 \text{de cet élément dans le volume V au temps } t \\
 + \\
 \text{la masse [Ma]} \\
 \text{qui est apportée par un rejet dans ce volume} \\
 + \\
 \text{la masse [M+]} \\
 \text{qui est entrée pendant } \Delta t \text{ par transport et dispersion} \\
 - \\
 \text{la masse [M-]} \\
 \text{qui est sortie pendant } \Delta t \text{ par transport et dispersion} \\
 + \\
 \text{la masse [Me]} \\
 \text{qui est entrée pendant } \Delta t \text{ par érosion du fond} \\
 - \\
 \text{la masse [Md]} \\
 \text{qui est sortie pendant } \Delta t \text{ par dépôt sur le fond.}
 \end{array}$$

La figure A1 illustre de façon simplifiée ce bilan de masse qui permet de calculer la nouvelle masse M1 présente dans le volume V après la période de temps Δt (M0 étant la masse présente au début) :

- les apports par les rejets (Ma) constituent une source de matériel ;

- le transport et la dispersion du rejet par les masses d'eau qui circulent entraînent une entrée M+ et une sortie M-. Ces quantités sont calculées en fonction des débits qui traversent les frontières de chaque volume ;

- les épisodes d'érosion induisent un apport de matériel (entrée : Me) et les épisodes de dépôt une perte de masse (sortie : Md).

Les phénomènes qui entrent en jeu dans le comportement des masses d'eau et de leurs constituants sont complexes. Il existe donc de multiples représentations pour décrire les forçages et les quantités Me, Ma, Md, M+ et M-. Ceci entraîne le développement de modèles différents en fonction des objectifs et des processus à simuler.

Conclusion

Plus de dix modèles mathématiques ont été utilisés, adaptés ou développés pour répondre aux questions posées dans le cadre du programme Seine-Aval. Chacun, dans sa discipline et selon son objectif de recherche, est en relation étroite avec les mesures sur le terrain et les expériences en laboratoire qui sont réalisées parallèlement. Cette démarche permet des avancées progressives dans la compréhension des phénomènes et dans la description des évolutions.

L'interaction des différentes disciplines a conduit à développer, dans le programme Seine-Aval, des modèles permettant une intégration progressive des processus pour simuler le comportement de l'écosystème dans sa diversité et sa complexité.

- Les modèles de processus ont été développés dans le souci d'améliorer la compréhension des mécanismes en minimisant le nombre de paramètres globaux et empiriques, afin d'assurer la portabilité des modèles. Cette portabilité est comprise ici dans le sens d'être capable de reproduire les phénomènes naturels dans différentes conditions et même dans différents estuaires et fleuves.

- Les modèles hydrodynamiques et de transport multivariable ont été développés dans le souci de reproduire la dynamique des masses d'eau et des particules en respectant leur variabilité spatio-temporelle, caractéristique des estuaires macrotidaux. Ils tiennent compte des cycles de marée, des gradients horizontaux dus à la bathymétrie très perturbée (chenaux, digues, vasières, fosses, etc.) et, enfin, des stratifications de densité dues au mélange des eaux douces et des eaux marines. Ils ont été également étudiés et testés pour permettre, dans la mesure du possible, de réaliser des simulations longues afin de décrire l'évolution de l'estuaire à l'échelle saisonnière et même annuelle.

L'application de ces modèles montre que l'estuaire a un caractère spécifique avec d'importantes variations spatio-temporelles des conditions physicochimiques dans la région. Mais elle démontre également que l'estuaire est indissociable de la continuité entre le fleuve amont et l'océan. En effet, les résultats révèlent dans la plupart des cas l'influence forte des apports par le fleuve amont et des échanges en aval avec la baie.

Afin de mieux traiter cette continuité, le programme Seine-Aval est en lien étroit avec les études réalisées dans le programme Piren-Seine et le programme PNEC-baie de Seine. Le même modèle de processus écologique (RIVE) est utilisé dans le fleuve et dans l'estuaire; le même modèle SAM-3D de transport multivariable est appliqué dans la baie de Seine et couplé à un modèle écologique adapté au milieu marin.

La boîte à outils de modélisation qui a été mise au point dans le programme Seine-Aval n'est ni complète, ni encore totalement exploitée. D'autres couplages sont envisagés et de nouvelles applications sont possibles. Nous en citerons ici quelques-unes pour exemple :

- transport sédimentaire :

- prise en compte des transits de sédiments non cohésifs, en particulier leur rôle dans les variations bathymétriques à moyen et long termes,
- prise en compte du comportement rhéologique des vases sous l'action des vagues ;

- fonctionnement microbiologique :

- processus dans le bouchon vaseux, à l'interface eau marine - eau douce,
- simulation sur tout le *continuum* fleuve - estuaire - océan ;

- dynamique des contaminants :

- étude plus complète des bilans avec une meilleure connaissance des incertitudes,
- étude d'autres contaminants que le cadmium (PCB par exemple) ;

- bioaccumulation des PCB :

- couplage du modèle de bioaccumulation avec un modèle de transport et un modèle écologique.

Dans l'état d'avancement actuel, l'ensemble des modèles a contribué à améliorer les connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème constitué par l'estuaire de la Seine. Ces modèles ont apporté un nouvel éclairage sur un grand nombre de questions posées dans le programme. Ils constituent une base de travail solide pour poursuivre les études et bientôt servir d'outil de gestion pour l'aménagement de l'estuaire. Ils sont le fruit d'une collaboration étroite entre plusieurs laboratoires qui ont su partager leurs compétences respectives dans les domaines de la modélisation, de la mesure sur le terrain, de la connaissance des processus en jeu dans les milieux fluvial et marin.

ou à un estuaire peu large et bien mélangé sur la verticale mais ne peut reproduire les gradients transversaux dus à un méandre par exemple.

Un modèle bidimensionnel horizontal, qui moyenne les variables sur la hauteur d'eau, ne peut simuler les inversions de courants sur la verticale dues à une stratification entre les eaux marines et les eaux douces. Il ne fera pas la différence entre le transport d'une variable en surface, en général plus rapide, et celui d'une variable du fond où les courants sont moins forts.

Il existe également des modèles bidimensionnels verticaux, qui moyennent les variables sur la largeur et décrivent leurs variations sur la verticale et sur l'axe longitudinal. Ces modèles sont bien adaptés aux estuaires étroits et stratifiés.

Notions sur la dispersion

Les modèles ne peuvent prétendre traiter des vitesses instantanées et/ou locales et reproduire tous les phénomènes aléatoires rapides. Les équations du mouvement et les équations de conservation de la masse sont donc systématiquement intégrées sur le temps. Les valeurs calculées sont des

valeurs moyennes sur quelques minutes. L'effet de transport et de mélange provoqué par ces mouvements aléatoires est pris en compte par l'intermédiaire de la viscosité et de la diffusion turbulente.

Certains modèles s'intéressent à des échelles de temps annuelles ou pluriannuelles. Dans certains cas, il est possible d'intégrer les équations sur des périodes de temps longues, en considérant que les phénomènes d'échelle de temps plus courtes induisent une dispersion. Ces phénomènes sont alors évalués à partir de formules semi-empiriques, avec des paramètres adéquats. Cette option est surtout utilisée dans les fleuves mais elle est dangereuse dans les estuaires où la propagation de la marée induit des processus non linéaires qu'il est difficile d'intégrer.

De la même manière, l'intégration des équations sur une dimension spatiale considère tous les phénomènes qui se développent dans cette direction comme des processus dispersifs, non résolus explicitement. Le biais introduit par l'intégration des équations sur une ou deux directions est négligeable lorsque les mouvements dans ces directions sont relativement homogènes.

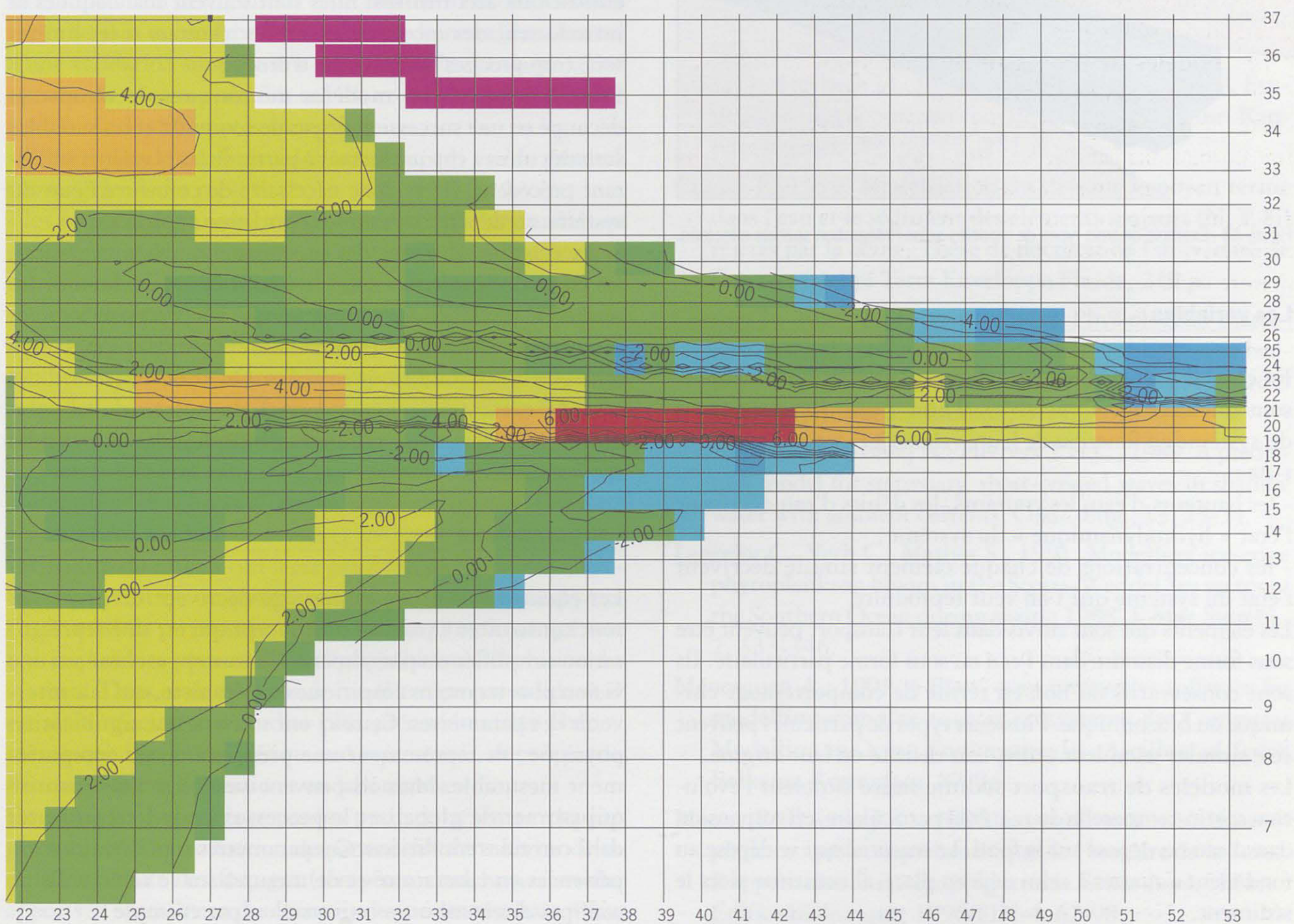


Figure A3 - Exemple de grille de calcul sur une zone géographique, décrite par sa bathymétrie (profondeurs représentées par des couleurs différentes tous les deux mètres). Dans chaque maille de la grille sont calculées les variables décrivant l'état du système (courants, hauteurs d'eau, concentrations...).

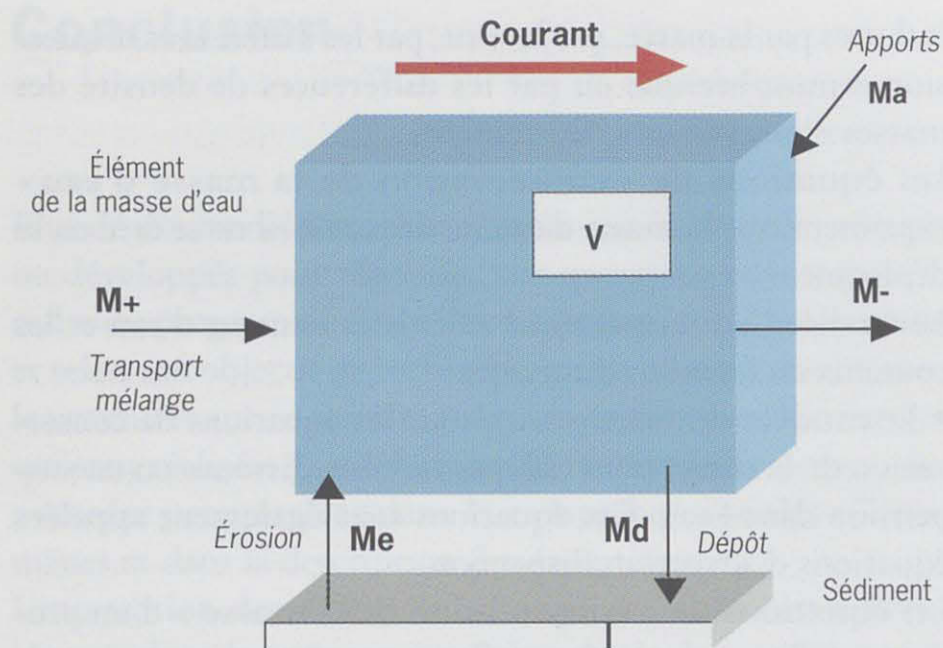


Figure A1 - Bilan de masse dans un volume d'eau.

Les modèles de processus

- Les modèles de processus physiques étudient plus spécifiquement les phénomènes physiques que le modèle de transport multivariable intègre de façon explicite ou plus ou moins empirique dans la représentation générale de l'estuaire. Les modèles de processus étudient l'évolution de certains forçages ou bien des processus d'échelles différentes qui viennent interférer avec le comportement général de la masse d'eau ou des sédiments.

- Les modèles de processus biochimiques s'intéressent en général aux constituants de l'eau (éléments du cycle naturel ou éléments apportés par l'homme). Ils étudient leurs transformations par réaction chimique ou par transfert dans telle ou telle phase du cycle de la matière. On dit que ces éléments sont non conservatifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent disparaître ou apparaître du fait de ces réactions au fur et à mesure de leur transport.

Ces apparitions et disparitions sont souvent traitées par des équations qui traduisent de nouveau un bilan ; toute variation de la quantité de masse pendant un instant est due à la disparition ou à l'apparition de cette même quantité :

$$\begin{aligned}
 & [M1] \text{ au temps } t + \Delta t \\
 & = \\
 & [M0] \text{ au temps } t \\
 & + \\
 & \text{la masse } [Mr+] \text{ qui a été créée pendant } \Delta t \\
 & \text{par réaction biochimique} \\
 & - \\
 & \text{la masse } [Mr-] \text{ qui a disparu pendant } \Delta t \\
 & \text{par réaction biochimique.}
 \end{aligned}$$

Le calcul de ces quantités $Mr+$ et $Mr-$ est réalisé par les modèles de processus qui, à partir d'équations du premier ordre ou d'ordre supérieur, représentent ces phénomènes de transformation en faisant parfois intervenir d'autres variables du milieu.

Les masses $Mr+$ et $Mr-$ sont soit des entrées/sorties du système, soit des entrées/sorties pour l'élément seul et correspondent alors à des transformations à l'intérieur du système, sans perte de masse.

Par exemple, le phytoplancton est brouté par le zooplancton :

- si le modèle simule seulement la masse de phytoplancton $Ph(t)$, on écrira :

$$Ph(t + \Delta t) = Ph(t) - M_{br}$$

où M_{br} est la masse de phytoplancton broutée pendant le temps Δt , qui disparaît du système ;

- si le modèle simule le système phytoplancton $Ph(t)$ + zooplancton $Zo(t)$, la perte de masse du phytoplancton sera associée à la création d'une certaine masse de zooplancton qui profite de cette nourriture pour croître (fig. A2).

Le couplage des modèles

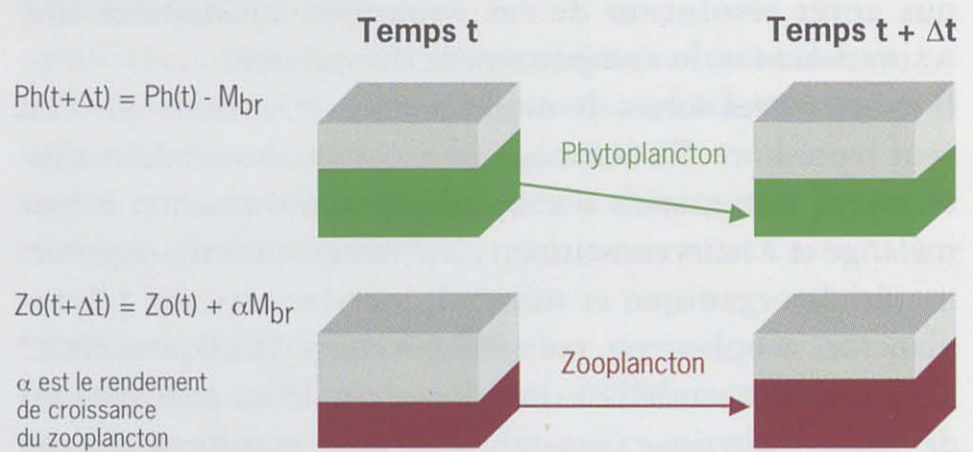


Figure A2 - Représentation simplifiée des évolutions inversées, entre deux instants, des masses de phytoplancton et de zooplancton dans un élément de volume ; le phytoplancton est brouté par le zooplancton.

- Les modèles de processus physiques peuvent, dans certains cas, être couplés aux modèles de transport multivariable pour calculer au cours du temps les termes qui sont intégrés aux équations.

- Les modèles de processus biochimiques peuvent être couplés aux modèles de transport multivariable spatialisés, lorsque l'on veut simuler une variable qui est transportée dans le milieu et qui se transforme en même temps.

Le couplage est réalisé dans les équations de conservation de la masse en écrivant par exemple :

$$\begin{aligned}
 & [M1] \\
 & = \\
 & [M0] + [Ma] \\
 & + \\
 & [M+] - [M-] \\
 & + \\
 & [Me] - [Md] \\
 & + \\
 & [Mr+] - [Mr-]
 \end{aligned}$$

Grille de calcul

À cause de leur complexité, les équations mathématiques des modèles de transport multivariable sont résolues par des techniques numériques à chaque pas de temps Δt , en chaque maille d'une grille de calcul qui couvre la zone (fig. A3).

Ce maillage peut avoir une résolution plus ou moins fine pour décrire la topographie et reproduire correctement les évolutions des différentes variables. Il peut représenter le volume du domaine en une, deux ou trois dimensions spatiales. On met ainsi en œuvre des modèles unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D) (fig. A4).

Un modèle unidimensionnel peut être adapté à un fleuve

- pour un polluant qui se dégrade en fonction du temps, on mesurera sa cinétique de dégradation en réalisant plusieurs expériences dans différentes conditions de température. On en déduira un paramètre qui représentera cette cinétique et qui variera en fonction de la température. Mais, dans ce cas, le paramètre ne décrira pas explicitement l'influence d'autres éléments (biomasses bactériennes par exemple).

La validation et la calibration

Puisque les modèles sont des représentations simplifiées des processus et qu'ils intègrent un grand nombre de phénomènes, il est toujours nécessaire de les valider. Cette validation se fait en comparant les résultats du modèle avec des mesures réalisées sur le terrain ou en laboratoire et qui rendent compte de l'évolution réelle du système que l'on veut reproduire. Le modèle est validé s'il simule le comportement du système qui a été effectivement observé dans plusieurs conditions différentes.

Certains jeux de données permettent dans certains cas de calibrer le modèle, c'est-à-dire d'ajuster la valeur des paramètres pour obtenir de bons résultats. La validation doit être réalisée à partir de jeux de données différents.

La comparaison des résultats d'un modèle avec des mesures sur le terrain ou en laboratoire en vue d'une calibration ou d'une validation suppose une certaine tolérance dans l'ajustement. Les écarts entre les calculs et les observations peuvent venir de différences sources :

- l'intervalle de confiance des mesures, qui est en général connu grâce à des répliqués* ;
- les mesures sont souvent des observations ponctuelles et ne sont pas nécessairement représentatives des domaines élémentaires que constituent les mailles du modèle ;
- le modèle étant une représentation simplifiée de la réalité, il ne peut prétendre reproduire dans toute leur complexité les évolutions réelles de toutes les composantes du milieu.

Selon les objectifs choisis, on peut chercher parfois à rendre seulement 70 % ou 90 % de la situation observée. Cette tolérance doit être associée à une certaine vigilance en vue d'identifier les sources d'erreurs et d'incertitudes. Certains écarts entre modèle et mesures peuvent provenir d'une variabilité du milieu qui n'est pas prise en compte ou, surtout, qui n'est qu'un comportement marginal. Mais il peut s'agir aussi de processus qui ne sont pas simulés et qui ont une importance pourtant non négligeable sur l'évolution du système. Dans ce dernier cas, le modèle n'est pas validé et il est alors nécessaire d'étudier plus précisément les phénomènes que l'on a négligés ou mal représentés, et ce à partir des mesures sur le terrain et en laboratoire.

De plus, les hypothèses posées pour représenter chaque phénomène, l'introduction de paramètres dans les modèles et la variabilité des forçages (tempêtes, crue, variation des apports...) entraînent des incertitudes sur les résultats. Pour mieux cerner l'effet de ces incertitudes sur les résultats, des études de sensibilité sont menées. Elles permettent de connaître les paramètres et les données auxquels sont sensibles les modèles, et qu'il faut donc évaluer avec plus de précision pour améliorer la qualité des résultats.

Références bibliographiques

- Bessineton C., Simon S., 1996. Recensement des poissons et analyses des régimes alimentaires du bar *Dicentrarchus labrax* et du flet *Platichthys flesus* en estuaire de Seine. Rapport d'activité du programme Seine-Aval, thème : Édifice biologique, 1996/FIN-4, 32-61.
- Billen G., Dessery S., Lancelot C., Meybeck M., 1989. Seasonal and year-to-year variations of nitrogen diagenesis in the sediments of a recently impounded basin. *Biogeochem.*, 8, 73-100.
- Billen G., 1992. Protein degradation in aquatic environments. *In: Microbial Enzymes in Aquatic Environments*. Chrost R.J., Springer Verlag (ed.), 123-143.
- Billen G., Garnier J., Le Guern G., 1999. SENEQUE 1.3. Notice d'utilisation. Programme Piren-Seine, UMR Sisyphe, univ. Paris VI, janvier 1999.
- Brenon I., Le Hir P. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* (à paraître).
- Brion N., Billen G., 1998. Une réévaluation de la méthode de mesure de l'activité nitrifiante autotrophe par la méthode d'incorporation de bicarbonate marqué au ^{14}C et son application pour estimer des biomasses de bactéries nitrifiantes. *Rev. Int. Sci. Eau*, 11, 283-302.
- Cossa D., Meybeck M., Idlafkih Z., Bombled B., 1994. Étude pilote des apports en contaminants par la Seine. Rapport Ifremer/Del, 94, 13, 151 p.
- Cugier P., 1999. Modélisation du devenir à moyen terme dans l'eau et le sédiment des éléments majeurs (N, P, Si) rejetés par la Seine. Thèse de doctorat de l'université de Caen, spécialité Terre Enveloppe Fluide, 249 p.
- Garnier J., Billen G., Servais P., 1992. Physiological characteristics and ecological role of small and large size bacteria in a polluted river (Seine river, France). *Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol.*, 37, 83-94.
- Holthuijsen L.H., Booij N., Herbers T.H.C., 1989. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coast. Eng.*, 13, 23-54.
- Lancelot C., Veth C., Mathot S., 1991. Modelling ice-edge phytoplankton bloom in the Scotia-Weddel Sea sector of the Southern Ocean during spring 1988. *J. Mar. System.*, 2, 333-346.
- Ménesguen A., 1991. « ELISE », an interactive software for modelling complex aquatic ecosystems. *In: Computer Modelling in Ocean Engineering 91*. Arcilla *et al.* (eds), Balkema Rotterdam, 87-94.
- Mouny P., Dauvin J.-C., 1996. Les communautés mésozooplanctonique et suprabenthique de l'estuaire de la Seine. Rapport d'activité du programme Seine-Aval, thème : Édifice biologique, 1996/FIN-4, 62-98.

Trois types de modèle

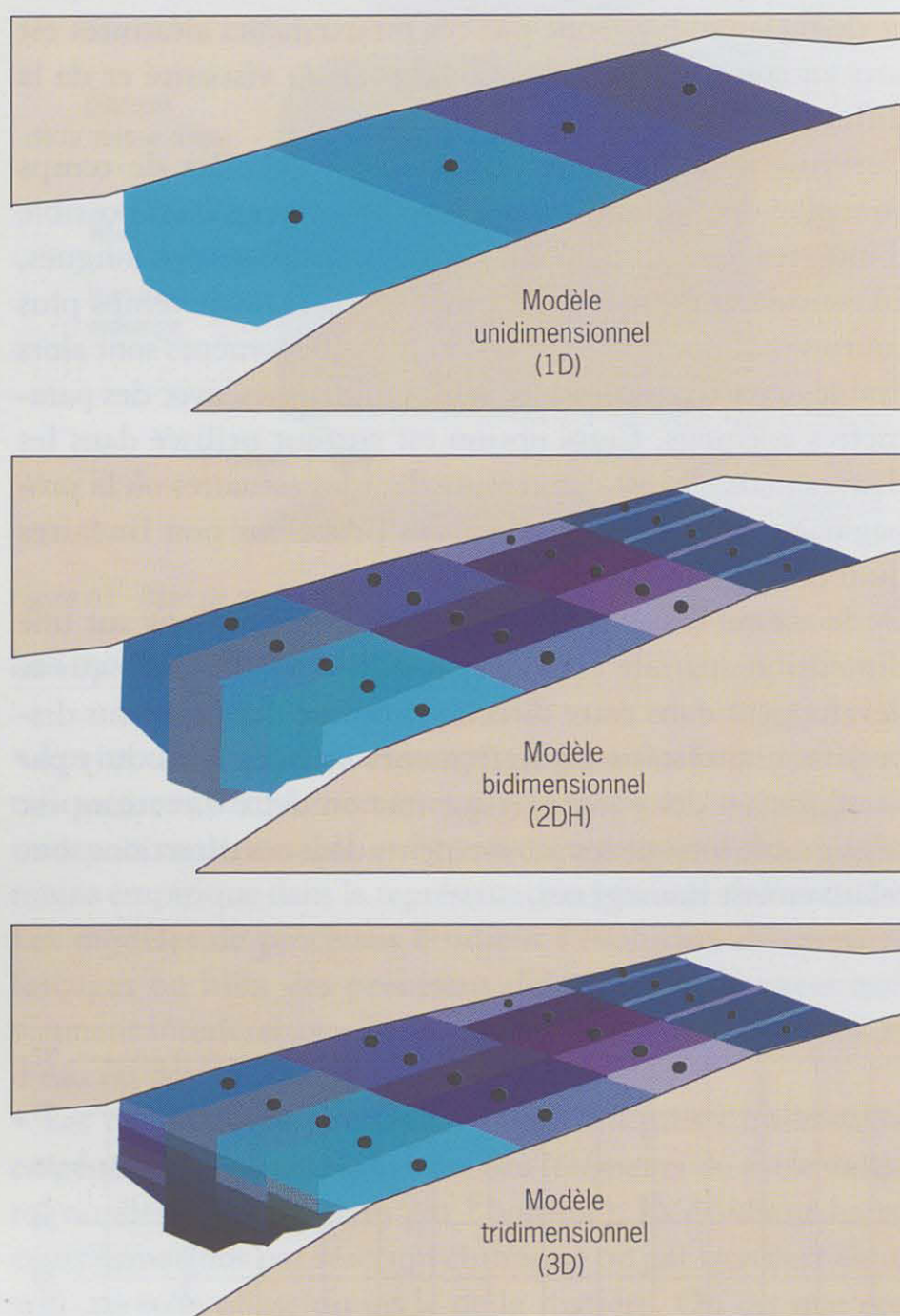


Figure A4 - Exemple de trois types de modèles selon l'intégration spatiale effectuée.

Les variables

En chaque point de la grille de calcul et à chaque instant t , sont calculées les « **variables d'état** » qui décrivent l'état du système en fonction de leurs valeurs à l'instant précédent $t-\Delta t$:

- les hauteurs d'eau, les courants, les débits d'eau décrivent l'état « hydrodynamique » du système ;
- les concentrations de chaque élément simulé décrivent l'état du système que l'on veut reproduire.

Les éléments qui sont suivis dans leur transport peuvent être sous forme dissoute dans l'eau ou sous forme particulaire. Ils sont conservatifs ou non en terme de comportement chimique ou biochimique. Plusieurs types de particules peuvent être simulés selon leur taille, leur densité ou leur origine.

Les **modèles de transport sédimentaire** simulent l'évolution spatio-temporelle du matériel particulaire, en suspension dans l'eau ou déposé sur le fond. Le matériel qui se dépose au fond vient s'ajouter à celui déjà en place, il constitue alors le sédiment.

Dans le programme Seine-Aval, les modèles de transport sédimentaire traitent en priorité des particules fines transportées en suspension, donnant lieu à des dépôts cohésifs (de type « vase »).

Certains processus qui décrivent, par exemple, une réaction entre plusieurs variables d'état font parfois intervenir

d'autres quantités variant dans le temps qui sont appelées les « **variables forçantes** ». Ces variables forçantes ne sont pas des variables d'état « internes » au système ; elles ne sont pas simulées par le modèle mais elles sont introduites de manière indépendante pour agir sur certains phénomènes. C'est ainsi que :

- la température est souvent considérée comme une variable forçante dont la valeur est donnée à partir de mesures ou de formules simplifiées. Elle a une influence sur la vitesse de certaines réactions ;
- le vent agit sur les courants à la surface de la mer. Il n'est pas simulé par les modèles utilisés ici et il est donc une variable forçante, externe au système.

Les conditions aux limites et les conditions initiales

En résolvant les équations en chaque point du maillage couvrant la zone d'étude, le modèle est capable de calculer les variables d'état du système en tout point et au cours du temps. Mais, aux limites ouvertes de la zone (c'est-à-dire non bornées par une côte), des informations supplémentaires sont nécessaires pour que le modèle tienne compte des échanges éventuels avec l'extérieur. On appelle ces informations les **conditions aux limites**. Elles sont souvent mal connues et introduisent des incertitudes sur les résultats si les limites sont trop proches du domaine d'étude.

Dans la plupart des modèles numériques, le temps est découpé en une succession de pas de temps Δt et les variables sont calculées à chaque instant à partir de leurs valeurs à l'instant précédent. Il est donc nécessaire de connaître l'état du système au départ : ce sont les **conditions initiales**.

Si les échelles de temps des processus simulés sont petites, les conditions initiales sont vite oubliées mais, lorsque les temps de résidence sont longs ou que les processus simulés évoluent lentement, les résultats restent pendant longtemps sensibles à ces conditions initiales. Or, il est souvent difficile de caractériser l'état initial du système dans son ensemble, ce qui, dans certains cas, introduit des incertitudes sur les résultats.

Les paramètres

Les équations mathématiques qui décrivent un processus sont construites à partir d'un concept qui est une représentation simplifiée du phénomène. Ce concept est basé sur une vision plus ou moins empirique et mécaniste, qui fait intervenir des paramètres. Ceux-ci ont souvent une signification physique ; ils représentent une propriété ou un comportement mesurable. Mais ils peuvent aussi être une quantité qui permet de globaliser le processus et de le représenter dans certaines conditions. Ces paramètres sont déduits d'expériences en laboratoire et de mesures sur le terrain. Ils ne sont pas des constantes universelles, par exemple :

- pour les particules qui tombent du fait de leur densité, on décrira ce processus de façon mathématique en introduisant une vitesse de chute qui est mesurée globalement en observant une masse de particules caractéristique du système que l'on veut décrire ;



Laboratoires participants au programme Seine-Aval

Cellule antipollution

- **Service de la navigation de la Seine**
Île Lacroix
71, avenue Chastellain
76100 Rouen

Cellule de suivi du littoral haut normand

16, quai Casimir Delavigne
76600 Le Havre Cedex

Cemagref

- **Division qualité des eaux**
14, avenue de Saint-Mandé
75012 Paris

Cergrene

- **École nationale des ponts et chaussées**
6-8, avenue Blaise Pascal
Cité Descartes Champs/Marne
77455 Marne-la-Vallée Cedex 2

CHU Rouen

- **Laboratoire de virologie**
1, rue de Germont
76031 Rouen Cedex

CIG - École des Mines de Paris

- **Centre d'informatique géologique**
35, rue Saint-Honoré
77305 Fontainebleau

Ifremer

Direction de l'environnement
et de l'aménagement littoral

- **Département Del/EC**
BP 70
29280 Plouzané
- **Département Del/PC**
BP 21105
44311 Nantes Cedex 3
- **Département Del/PC**
BP 330
83507 La Seyne/Mer Cedex

IPSN

- **Laboratoire d'études radio-écologiques de la façade atlantique**
Rue Max-Pol Fouchet - BP 10
50130 Octeville

Muséum national d'histoire naturelle

- **Laboratoire de biologie des invertébrés marins et malacologie**
57, rue Cuvier
75231 Paris Cedex 05

Parc naturel régional de Brotonne

- **Mission patrimoine naturel**
Maison du Parc
76940 Notre-Dame-de-Bliquetuit

Université de Caen

- **Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière - UPRES - A 6143 CNRS**
- **Groupe ornithologique normand (GONm)**
- **Laboratoire de biologie et biotechnologies marines**
Esplanade de la Paix
14032 Caen Cedex

Université du Havre

- **Laboratoire d'écotoxicologie**
25 rue Philippe Lebon,
BP 540
76600 Le Havre Cedex
- **Laboratoire de mécanique**
Centre havrais d'études
et de recherche
Quai Frissard - BP 265
76055 Le Havre Cedex
- **Cirtai**
BP 1123
76063 Le Havre Cedex

Université de La Rochelle

- **Laboratoire de biologie et biochimie**
Pôle sciences et technologie
Avenue Marillac
17042 La Rochelle Cedex 1

Université libre de Bruxelles

- **Groupe de microbiologie des milieux aquatiques**
Campus de la Plaine
CP 221
B 1050 Bruxelles

Université de Lille

- **Laboratoire de chimie analytique et marine UPRES - A 8013 ELICO**
Bâtiment C 8
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
- **Station marine de Wimereux UPRES - A 8013 ELICO**
28, avenue Foch
BP 80
62930 Wimereux

Université Pierre et Marie Curie

- **Laboratoire d'hydrobiologie**
12, rue Cuvier
75005 Paris
- **Laboratoire CNRS - UMR Sisyphe 7619**
4, place Jussieu, tour 26, 5^e étage
75005 Paris
- **Institut d'hydrologie et de climatologie**
Laboratoire de chimie analytique
4, place Jussieu, boîte courrier 122
75252 Paris Cedex 5

Université de Rennes 1

- **Laboratoire de zoologie et d'écophysiologie**
UA INRA et UMR 1853 du CNRS
Campus Beaulieu
Avenue du Général Leclerc
35042 Rennes Cedex

Université de Rouen

- **Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière - UPRES - A 6143 CNRS**
- **Laboratoire de microbiologie du froid**
- **Laboratoire de biologie végétale et écologie**
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex



Glossaire

Adsorption : fixation physique et/ou chimique d'un atome ou d'une molécule par la surface d'un solide (appelé adsorbant).

Bactéries autotrophes : bactéries qui sont capables d'élaborer leurs propres substances organiques à partir d'éléments minéraux.

Bactéries nitrifiantes : bactéries autotrophes* qui oxydent l'ammoniaque en nitrites (bactéries nitrosantes) et les nitrites en nitrates (bactéries nitratantes) selon le cycle de la nitrification, conduisant à la minéralisation de la matière organique.

Bactéries hétérotrophes : bactéries qui se nourrissent de substances organiques et ne peuvent effectuer elles-mêmes la synthèse de leurs éléments constitutifs.

Bouchon vaseux : zone de turbidité maximale particulière aux estuaires, comprise entre des eaux douces peu chargées en suspension, à l'amont, et les eaux salées marines. Sa situation n'est pas stable; elle évolue au gré des conditions hydrologiques (débits, cycles de marée).

Cadmium : métal blanc ductile et malléable. Ce métal fait partie du groupe 2B de la classification périodique. Sa structure électronique conduit, par oxydation, à la formation de Cd^{2+} (espèce dite « libre »).

Cation : ion positif qui, dans une électrolyse, se porte à la cathode.

Chaîne trophique : suite de maillons reliés par des liens trophiques, dans laquelle la (ou les) population(s) constituant un maillon consomme(nt) le maillon précédent et sert (servent) de nourriture au maillon suivant.

Cinétique chimique : étude de la vitesse et du mécanisme des réactions chimiques.

Cohésif : sédiment à caractère cohésif résultant principalement de la présence d'argiles minérales ou de films biologiques. Les grains tendent à se lier entre eux et à former des agrégats.

Complexation : formation d'un complexe métal-ligand. Par exemple : complexe cadmium-chlorure : $CdCl_2$.

Cycle lunaire : intervalle de temps compris entre deux nouvelles lunes consécutives.

Désorption : retour en solution d'un atome ou d'une molécule qui était fixé à la surface d'un solide (voir adsorption).

Eulérien : méthode de résolution ou de mesure en un point fixe.

Flux brut (/Flux net) : quantité de matière qui arrive dans l'estuaire par le fleuve (/ qui sort de l'estuaire par la limite aval) pendant une période de temps donnée.

Forçage : champ de forces extérieures qui agissent sur le milieu et provoquent des mouvements ou des changements d'état.

Force de Coriolis : force engendrée par l'accélération de Coriolis sur tout mobile à la surface de la Terre, dès lors qu'il ne se situe pas dans le plan équatorial. À cause de la rotation de la Terre autour de son axe, les objets situés à la surface de celle-ci sont soumis à une force perpendiculaire à leur vitesse de déplacement et dirigée vers la droite dans l'hémisphère nord (vers la gauche dans l'hémisphère sud).

Gradient : taux de variation d'une grandeur physique en fonction de la distance.

Hystérésis : retard de l'effet sur la cause dans le comportement des corps soumis à une autre action physique.

Lagrangien : méthode de résolution ou de mesures qui suit les particules d'eau dans leurs mouvements.

Ligand : partie d'un complexe (édifice chimique covalent formé à partir de deux éléments, ions ou molécules. Par exemple, $CdCl^+$ est un complexe formé par Cd^{2+} et le ligand Cl^-). Le ligand peut être organique (molécule organique) ou minéral (Cl^- par exemple).

Paramètre : quantité à fixer librement, maintenue constante, dont dépend une fonction de variables indépendantes, une équation ou une expression mathématique.

Particulaires : matériel composé de particules, définies comme étant de la matière arrêtée par un filtre dont le diamètre minimal des pores est égal à $0,45 \mu m$.

PCB (Polychlorobiphényles) : groupe de substances chimiques définies comme hydrocarbures halogénés à haut poids moléculaire. Ils sont connus sous différents noms selon le pays d'origine : arochlor (USA), pyralène, phénochlore (France), clophen (Allemagne), fenclor (Italie), kanechlore (Japon), etc.

Répliquat : résultat d'une mesure qui a été dupliquée plusieurs fois sur un même échantillon. L'objectif de cette démarche est de valider la méthode de dosage ou bien d'évaluer les incertitudes de la mesure.

Rhéologie : étude à l'échelle macroscopique de la réponse dynamique et mécanique des matériaux. Analyse de la relation entre les contraintes exercées sur un matériel et les conditions de déformation et d'écoulement induites au sein de ce matériel.

Rhéométrie : quantification expérimentale des propriétés rhéologiques des matériaux (viscosité, module de rigidité, etc.).

Spéciation : forme chimique sous laquelle une molécule ou un ion est présent dans l'eau de mer.

Trophique : qui concerne la nutrition des tissus.

16 ► Les modèles : outils de connaissance et de gestion

Beaucoup d'études qui ont été menées pendant le programme Seine-Aval ont donné lieu au développement et/ou à l'application des modèles mathématiques. Ces outils de recherche simulent différentes variables du milieu et s'intéressent à des processus relevant de disciplines variées (hydrodynamique, transports dissous et particulaire, microbiologie, chimie, biologie). L'hétérogénéité de ces phénomènes et de leurs vitesses respectives, ainsi que leur interaction parfois étroite dans l'écosystème, conduisent à développer une démarche intégrée de modélisation qui permette, à terme, leur couplage. Ce fascicule présente de façon globale et succincte tous ces modèles mathématiques, en introduisant cette démarche et les objectifs poursuivis.

Many studies which were undertaken during the program « Seine Aval » gave place to the development and/or the application of mathematical models. These tools of search simulate various variables of the environment and are interested in concerning process varied disciplines (hydrodynamic, dissolved and particulate transport, microbiology, chemistry, biology). The heterogeneity these phenomena and their respective speeds, like their sometimes narrow interaction in the ecosystem, result in developing an integrated process of modeling which allows their coupling in the long term. This booklet presents in a total and brief way all these mathematical models, by introducing this step and the aims in view.

Cette collection présente l'ensemble des résultats du programme Seine-Aval. Chaque fascicule de cette collection a été élaboré de manière à pouvoir être lu indépendamment des autres.

Chaque année, l'essentiel de l'information scientifique produite est consigné dans des rapports thématiques et de synthèse pouvant être consultés auprès de la cellule de coordination du programme :

Programme Seine-Aval

Université de Rouen (Régis Hocdé)

Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière

76821 Mont-Saint-Aignan Cedex

e-mail : regis.hocde@univ-rouen.fr

tél. 33 (0)2 35 14 65 27 - fax 33 (0)2 35 14 70 22



programme scientifique
Seine-Aval

- 1 - Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes
- 2 - Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau
- 3 - Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique
- 4 - Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension
- 5 - L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique
- 6 - Contaminations bactérienne et virale
- 7 - Patrimoine biologique et chaînes alimentaires
- 8 - La contamination métallique
- 9 - Fer et manganèse : réactivités et recyclages
- 10 - Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire
- 11 - La dynamique du mercure
- 12 - Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir
- 13 - Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant ?
- 14 - Des organismes sous stress
- 15 - Zones humides de la basse vallée de la Seine
- 16 - Les modèles : outils de connaissance et de gestion
- 17 - La résistible dégradation d'un estuaire

Région Haute-Normandie
25, boulevard Gambetta, BP 1129,
76174 Rouen Cedex, France
tél. 02 35 52 23 31 - fax 02 35 52 22 38

Agence de l'Eau Seine-Normandie
51, rue Salvador-Allende
92027 Nanterre Cedex
tél. 01 41 20 16 00 - fax 01 41 20 16 89

Éditions Ifremer
BP 70, 29280 Plouzané, France
tél. 02 98 22 40 13 - fax 02 98 22 45 86
e-mail : editions@ifremer.fr

Diffusion : ALT Brest
Service Logistique
3, rue Édouard Belin
BP 23 29801 Brest Cedex 9
tél. 02 98 02 42 34 - fax 02 98 02 05 84

ISBN 2-84433-028-2 Programme Seine-Aval
ISBN 2-84433-023-1

35 F - 5,34 €

