



**Les modèles pressions/impacts pour
la Directive-Cadre Eau :
Bilan des outils actuellement utilisés
et des besoins futurs
Rapport**

***Ministère de l'Écologie et du Développement
Durable***

Jean-Marc BRIGNON

*Unité Modélisation et Analyse Economique
pour la gestion des Risques (MECO)*

Direction des Risques Chroniques (DRC)

Mars 2004

Les modèles pressions/impacts pour la Directive-Cadre Eau :

Bilan des outils actuellement utilisés et des besoins futurs

Rapport

Mars 2004

JEAN-MARC BRIGNON

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Jean-Marc BRIGNON	Michel NOMINE	Frédéric MARCEL
Qualité	Ingénieur d'Études et de Recherches DRC	Délégué Scientifique DRC	Directeur-Adjoint de la DRC
Visa			

Ce document comporte 51 pages (hors couverture).

TABLE DES MATIERES

1. RÉSUMÉ.....	4
2. INTRODUCTION.....	7
3. LES EXIGENCES DE LA DIRECTIVE-CADRE SUR L’EAU EN MATIERE DE MODÉLISATION	8
3.1 LES PRINCIPALES EXIGENCES	8
3.2 LES PARAMÈTRES DEVANT ÊTRE REPRÉSENTÉS PAR LES MODÈLES.....	9
4. LES OBJECTIFS ET LES LIMITES DE L’ETUDE	11
5. BILAN DES MODELES UTILISES	14
5.1 EAUX SUPERFICIELLES CONTINENTALES	14
5.1.1 <i>Hydraulique, Physico-chimie et phyto/zooplancton.....</i>	<i>14</i>
5.1.2 <i>Modélisation de l’état écologique.....</i>	<i>27</i>
5.1.3 <i>Modélisation des transferts de micropolluants et de substances prioritaires dans les eaux de surface.</i>	<i>29</i>
5.2 EAUX SOUTERRAINES	32
5.3 EAUX CÔTIÈRES ET LITTORALES	35
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	37
6.1 INTERET ET LIMITES DES MODELES POUR LA DIRECTIVE-CADRE	37
6.2 QUELQUES PROPOSITIONS POUR UN USAGE RAISONNE DES MODELES.....	40
6.3 VERS DES MODELES INTEGRES « HYDRO-BIOGEO-ECO-SOCIO-ECONOMIQUES » ?	41

ANNEXES

ANNEXE 1 : CONVERSION DES DONNÉES DE REJET DANS SENEQUE ET PEGASE

ANNEXE 2 : CARACTERISATION DES MILIEUX PHYSIQUES AVEC LE MODELE QUALPHY

ANNEXE 3 : LE CLUSTER DE PROJETS EUROPEENS DE RECHERCHE “CATCHMOD”

ANNEXE 4 : REFERENCES DES DOCUMENTS CITES ET AUTRES DOCUMENTS CONSULTES

1. RESUME

La Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) implique de construire des programmes de mesures¹ de contrôle des rejets de polluants. Le but de ces programmes est de restaurer une bonne qualité écologique des milieux, en prenant en compte le coût et l'efficacité des mesures. La DCE implique donc potentiellement le recours à des outils techniques de deux types

- d'une part des modèles « pressions/impacts », outils de simulation de l'impact des pressions sur les milieux (modèles hydrologiques et de qualité de l'eau, modèles écologiques)
- d'autre part des modèles intégrés, c'est à dire associant des modèles pressions/impacts, des données sur les coûts et l'applicabilité des mesures, et un système pouvant générer des combinaisons de mesures avec un ratio coût / réduction des impacts minimal.

L'objet de ce travail est de faire un point détaillé sur les besoins concernant les outils de modélisation de type pressions/impacts, comme une première étape vers une analyse des besoins et des développements nécessaires en matière de modèles intégrés. Les informations sur les modèles pressions/impacts utilisés en France ont été obtenues à l'aide d'une série d'entretiens avec leurs principaux utilisateurs et concepteurs, complétés par l'étude de rapports, documents et articles. On a évalué les capacités de ces modèles non seulement à prévoir quantitativement le risque de non-atteinte du bon état écologique, mais également à éclairer les processus physiques et biologiques en jeu, à poser clairement les termes des choix de gestion, à consolider des données et des connaissances.

On a traité spécifiquement des cas des modèles hydrobiogéochimiques pour les eaux de surface (continentales et estuaires), des modèles quantitatifs pour les eaux souterraines, des modèles de transfert des micropolluants (métaux, pesticides, ...) dans les eaux de surface et les eaux souterraines, et des couplages entre ces différents modèles.

D'une façon générale, la capacité prédictive des modèles n'est pas leur intérêt majeur : certains ne sont pas capables de prévoir correctement la réponse des milieux à des changements de contraintes, pour d'autres cette capacité n'a pas été véritablement évaluée, et pour les autres, elle est correcte mais moyenne.

On ne dispose pas aujourd'hui des outils opérationnels (les modèles et/ou le temps à y consacrer pour les utiliser de façon très intensive) pour effectuer une véritable analyse de risque (probabiliste) de non-atteinte du bon état de masses d'eau. Le rôle des modèles devra donc être plus d'aider à comprendre et communiquer les enjeux, y compris illustrer les incertitudes, en réalisant des simulations ponctuelles.

D'un point de vue plus technique, ce sont à notre avis les modèles traitant des micropolluants (métaux, pesticides) dans les eaux de surface et les eaux souterraines, qui sont les moins aptes à une utilisation à des fins quantitatives prédictives (par exemple, en termes de concentrations chiffrées dans les eaux souterraines à un horizon lointain, ou de simulations quantitatives de l'effet de zones tampons en eau de surface sur les

¹ Conformément à la terminologie de la DCE, l'expression "programme de mesures" est adoptée, dans laquelle le mot "mesure" n'est pas à prendre dans son sens métrologique mais désigne une action réduisant une émission de polluants ou amoindrissant leur impact.

concentrations dans les eaux superficielles). Des utilisations pour éclaircir des questions d'ordre de grandeurs temporels pour les eaux souterraines, ou de flux sont par contre envisageables.

La modélisation de la réponse écologique des milieux aux pressions, aux échelles de temps et d'espace requises par la DCE, est encore une question du domaine de la recherche. Les modèles fonctionnant à ces échelles n'en sont qu'aux premières expériences, et le lien entre ces modèles et les modèles hydrologiques et biogéochimiques est encore très partiel. Etant donnée l'importance de l'état écologique dans la DCE, le fait que la modélisation ne soit pas encore opérationnelle sur cet aspect limite son intérêt à moyen terme. Par contre, à plus long terme, ce problème sera résolu : la prise en compte dès maintenant des modèles écologiques préparerait donc le long terme et permettrait de prendre en compte la connaissance disponible et les incertitudes liées à l'impact écologique dans les processus de décision.

Pour ce qui est de l'utilisation concrète de modèles lors de l'élaboration des programmes de mesures de la DCE dans les prochaines années, on peut proposer :

- Une attention particulière aux processus de transformation des données de rejets agricoles, domestiques et industriels provenant des fichiers des Agences de l'Eau en données assimilables par les modèles, pour les unifier afin de pouvoir comparer les résultats de simulation d'une Agence à l'autre.
- Le calage et la validation sont des opérations-clé pour la construction d'un modèle opérationnel et pour sa crédibilité ultérieure. Il serait utile de créer et conserver des dossiers de référence de calage et de validation des modèles utilisés. La validation devrait autant que possible concerner un nombre suffisant de situations représentatives, d'un point de vue hydrologique et de qualité d'eau, des situations futures que l'on souhaitera ensuite simuler avec le modèle.
- La quantification ou la qualification de l'incertitude des résultats de simulations est une dimension importante de l'utilisation de modèles. L'identification des principales sources d'incertitudes et de leur impact sur les résultats des modèles devrait être faite systématiquement. L'intégration de plusieurs modèles est souhaitable, puisque la Directive-Cadre promeut la gestion intégrée des ressources. Cependant, l'accumulation de modèles peut accroître l'incertitude et rendre moins robustes les simulations. Pour cette raison, la validation d'une chaîne de modèles doit être également dans la mesure du possible réalisée, même si chaque modèle a été individuellement validé auparavant. Il faut être également attentif au fait que des paramètres qui étaient peu sensibles dans un modèle peuvent le devenir lorsque ce modèle est intégré dans une chaîne de modélisation.
- La prise en compte de l'impact des situations hydrologiques sur la qualité de l'eau est actuellement déséquilibrée entre les situations d'étiage et les situations de crue ou de pollution par les rejets d'eaux de ruissellement urbain et rural. Les modèles ont plus de facilité à simuler les situations d'étiage, et celles-ci sont donc plus souvent simulées que les périodes de crue et de pluie. Pourtant, les investissements en matière de protection contre la pollution par temps de pluie deviennent très lourds, et l'exposition des écosystèmes à des dégradations de leur environnement provient pour une part significative des événements pluvieux. Un effort de ré-équilibrage dans ce domaine pourrait être fait.

Les modèles de simulation envisagés dans ce rapport constituent la première brique de modèles intégrés de construction, d'évaluation du coût et de l'efficacité et finalement du choix de stratégies de réduction des émissions. Il semble que peu d'études soient réalisées en matière de modélisation intégrée en France, mais il y a par contre une assez forte activité en termes de recherche européenne (« cluster » de projets « catchmod » du 5^{ème} PCRD notamment). Ces projets, notamment certains qui vont définir les méthodologies d'emploi de ces modèles intégrés (projet « harmonica ») devraient être suivis, et leurs conclusions pourraient être l'un des éléments pour nourrir la réflexion préalable sur le sujet en France.

2. INTRODUCTION

La Directive-Cadre sur l'Eau implique (exigences formulées à l'Article 4) que les Etats suivent les rejets et leurs incidences sur les masses d'eau de surface, et mettent en œuvre des programmes de mesures (notamment de réduction des rejets), permettant le respect des seuils de qualité (Article 11).

L'Annexe III précise que pour élaborer les programmes de mesures, il faut apprécier, « sur la base de leur coût potentiel la combinaison la plus efficace au moindre coût des mesures ».

La DCE implique donc potentiellement le recours à des outils qui permettraient d'estimer l'efficacité des mesures envisagées (quelle réduction d'impact), leur coût, et qui seraient utiles pour aider à déterminer « la » combinaison la moins coûteuse et la plus efficace de telles mesures.

Des outils techniques, dont l'emploi est suggéré par la Directive, aux côtés d'autres outils comme les jugements d'experts et la négociation, et qui permettraient de mener à bien ce programme sont de deux types :

- les outils de modélisation de l'impact des pressions sur les milieux (modèles de qualité de l'eau, modèles écologiques)
- les modèles intégrés, c'est à dire des outils d'aide à la décision associant les modèles d'impact précédents, des données sur les mesures possibles et leurs coûts, leur applicabilité ou leur acceptabilité, et un système pouvant générer voire sélectionner des combinaisons de mesures présentant un ratio coût / réduction des impacts minimal, avec la contrainte de respect d'objectifs environnementaux. Il s'agit d'une architecture classique qui a été mise en œuvre de façon opérationnelle à grande échelle en Europe (Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière et Directive NEC), et aux USA pour bâtir des programmes de réduction de la pollution atmosphérique.

L'objet de ce travail est de faire un point détaillé sur les besoins concernant les outils de modélisation de l'impact, sur les pratiques actuelles en France, tout particulièrement au sein des Agences de l'Eau, et sur les possibilités offertes par la modélisation -et les difficultés également-, à l'échéance prévue par la DCE pour remettre les programmes de mesures.

Il s'agit d'une première étape vers une analyse des besoins et des développements nécessaires en matière de modèles intégrés.

3. LES EXIGENCES DE LA DIRECTIVE-CADRE SUR L'EAU EN MATIERE DE MODELISATION

3.1 LES PRINCIPALES EXIGENCES

Les principales exigences de la Directive-Cadre sur l'Eau qui peuvent motiver l'emploi d'outils de modélisation de l'impact des pressions sont les suivantes :

1. Définir l'état (ou les « conditions ») de référence (très bon état écologique ou potentiel écologique maximal) des masses d'eau (Annexe II, point 1.3).

L'alinéa iii) précise qu'on peut avoir recours à

- une « base spatiale » (mesures),
- un « modèle » (modèles prédictifs ou méthodes a posteriori, ainsi que précisé dans l'alinéa v))
- ou un « avis d'expert ».

2. Désigner des masses d'eau artificielles ou fortement modifiées (article 4 3. A)

3. Définir des objectifs pour l'état des masses d'eau (y compris les objectifs dégradés pour les masses d'eau fortement altérées, article 4 5.)

4. Définir les délais de report des objectifs (Article 4 a) iii), article 4 c)) notamment en raison de conditions naturelles rendant impossible le respect du délai de quinze ans, par exemple pour un aquifère avec des temps de résidence très longs des polluants.

5. Déterminer l'incidence de l'activité humaine sur l'état des masses d'eau (article 5 1) deuxième tiret).

Pour les eaux de surface, l'Annexe II 1.5 précise qu'il faut évaluer « la probabilité que les masses d'eau de surface ... ne soient plus conformes aux objectifs de qualité », et que les Etats Membres « utilisent les données existantes de la surveillance environnementale » et « peuvent utiliser des techniques de modélisation comme outils d'évaluation ».

Par contre, il n'est pas fait référence à la modélisation dans cette Annexe pour les eaux souterraines.

6. Déterminer des programmes de mesures permettant d'atteindre les objectifs de qualité environnementale en tenant compte des résultats de l'analyse des incidences (Article 11).

7. Réalisation des plans de gestion de districts hydrographiques (Article 13). L'annexe VII à laquelle renvoie cet article précise que l'analyse des incidences de la pollution doit couvrir à la fois la pollution diffuse et la pollution ponctuelle
8. Réduire les rejets de substances prioritaires et supprimer les rejets de substances dangereuses prioritaires (Article 16). Les propositions pour atteindre cet objectif doivent être faites par la Commission. Des outils de modélisation pourraient être utilisés pour évaluer l'efficacité et le coût de mesures de réduction des rejets, notamment en vertu de l'alinéa 6 (chaque proposition de contrôle de la Commission doit spécifier comment on va évaluer son efficacité).
9. Conception des réseaux de surveillance de l'état quantitatif et chimique des eaux souterraines, et de l'état chimique et écologique des eaux de surface (Annexe V).

On constate à la lecture de la Directive , que les lieux d'application potentielle des modèles sont l'ensemble des types de masses d'eau qu'elle répertorie : eaux superficielles, eaux souterraines, eaux de transition, eaux côtières.

La Directive a pour objectif général de promouvoir une gestion « intégrée » (considérants 9 et 26) des ressources en eau. Cela implique par exemple que les interactions entre la gestion des eaux superficielles et celle des eaux souterraines devraient être prises en charge par les modèles utilisés.

On a traité spécifiquement des cas des modèles hydrobiogéochimiques pour les eaux de surface, des modèles quantitatifs pour les eaux souterraines, des modèles de transfert des micropolluants (métaux, pesticides, ...) dans les eaux de surface et les eaux souterraines,

3.2 LES PARAMETRES DEVANT ETRE REPRESENTES PAR LES MODELES

La DCE, à travers les définitions des états écologiques (Annexe V 1.1. et 1.2) implique également de façon indirecte des exigences plus techniques sur les paramètres physico-chimiques et biologiques qui devraient idéalement être pris en charge par les modèles :

Paramètres biologiques (avec composition et abondance) :

- flore aquatique (dont phytoplancton, macrophytes, phytobenthos)
- faune benthique invertébrée
- ichtyofaune (avec structure d'âges)

Pour les eaux de surface, la définition des états biologiques précise que doivent être pris en compte « la fréquence et l'intensité de l'efflorescence phytoplanctonique », « la croissance accélérée du phytobenthos », « les touffes ou couches bactériennes » qui pourraient perturber le phytobenthos (Annexe V, 1.2).

Paramètres physico-chimiques « soutenant les paramètres biologiques ».

Paramètres généraux :

- transparence (sauf eaux de surface)
- température
- bilan d'oxygène
- salinité
- pH, acidification
- concentration en nutriments

Polluants spécifiques (micropolluants)

Paramètres hydromorphologiques influençant les paramètres biologiques:

- régime hydrologique (sauf eaux de transition et côtières)
- régime des marées (eaux de transition et côtières)
- continuité (pour un cours d'eau)
- conditions morphologiques (structure des rives, variation de la profondeur, substrat du lit)

Il est également implicite que des modèles qui seraient utilisés sur ces aspects hydromorphologiques devraient être aptes à représenter le lien entre d'une part les paramètres physico-chimiques et hydromorphologiques, et d'autre part les paramètres biologiques (cf tableaux définissant les éléments de qualité hydromorphologique à l'Annexe V).

Quelques exigences techniques spécifiques ont des implications possibles en termes de besoins en modélisation ou d'outils d'aide à la décision :

- la définition des états écologiques des eaux de surface (Annexe V section 1.2) implique de pouvoir qualifier certains phénomènes, notamment l'efflorescence algale, en termes de fréquence, d'intensité, et de durée sur une année.
- Dans le cadre de la présentation des résultats de la surveillance des milieux, la DCE demande l'identification des tendances d'évolution des polluants (Annexe V section 2.4.4.), ce qui suppose l'utilisation d'outils statistiques adaptés, permettant de « démontrer » les renversement de tendance, et de fournir une incertitude sur les résultats des calculs statistiques (« niveaux de confiance »).

4. LES OBJECTIFS ET LES LIMITES DE L'ETUDE

L'objectif de cette étude est de faire le point sur les outils de modélisation actuellement utilisés ou envisagés pour remplir les obligations 2 à 9 parmi celles rappelées plus haut, et particulièrement les points 5 et 6, en privilégiant le point 6 (élaboration des programmes de mesures).

En effet,

- comme cela est rappelé dans le guide méthodologique pour l'identification des pressions et des impacts (Aquascop, 2003), « la DCE ne demande pas d'analyser le mécanisme de transformation de la pression en un ou des impacts. En revanche ce lien sera utile pour mieux cibler les programmes d'action qui suivront . ».
- pour les outils nécessaires pour le point 1 (conditions de référence), nous renvoyons principalement aux travaux du Cemagref (Wasson 2001) et (Wasson, 2002), qui présentent les différentes approches possibles, et développent ensuite celle des hydro-écorégions, et définissent dans ces régions les conditions de référence en termes de peuplements d'invertébrés.

Ce rapport contient parfois des évaluations sur les outils de modélisation : il ne s'agit pas d'un avis sur leur intérêt et leur utilité scientifique en tant que moyens de faire progresser la connaissance, mais uniquement d'un jugement sur leur utilité et leur efficacité, d'une réflexion sur la façon dont on pourrait s'en servir, dans le seul contexte d'une utilisation en tant qu'outils de gestion pour la DCE, par les organismes en charge de sa mise en œuvre en France.

Cette étude n'est pas non plus une revue exhaustive des outils disponibles sur le marché, car les choix en la matière ont déjà été préparés et en grande partie faits par les Agences de l'Eau.

Dans ce rapport, nous nous concentrerons sur les outils de modélisation suivants :

- Modèles hydrologiques et hydrauliques,
- Modélisation du transfert de micropolluants et des nutriments C/N/P (eaux de surface et souterraines).
- Modélisation des espèces phytoplanctoniques dans la colonne d'eau et le compartiment benthique des eaux de surface
- Modélisation des populations piscicoles
- Modélisation des sédiments dans les eaux de surface,

Les modèles statistiques utiles notamment pour identifier les tendances d'évolution passée de la qualité de l'eau ne sont pas abordés dans ce rapport.

La nécessité rappelée plus haut de pouvoir travailler sur les relations entre les différents types d'eaux et les différentes dimensions du bon état implique également de travailler sur la notion d'outil intégré² de modélisation, composé de plusieurs modules capable

² Le mot « intégré » n'a donc pas ici le même sens qu'au début du résumé. Ici on parle d'intégration entre

d'échanger des informations, éventuellement en cours de calcul. La définition du bon état quantitatif et chimique des eaux souterraines (Annexe V sections 2.1.2. et 2.3.2.) justifie également le recours à des modèles capables de représenter les écoulements dans les nappes souterraines, les échanges avec les eaux de surface, et les intrusions souterraines d'eaux salées.

Etant donné l'importance accordée dans ce travail à l'utilisation des modèles pour l'élaboration de programmes de mesures, on sera intéressé à leurs potentialités dans les domaines suivants :

- la capacité prédictive des modèles (prévoir correctement les conséquences de changements de pressions sur l'état des masses d'eau). La prévision, ainsi que la DCE le rappelle explicitement, est la prévision d'un *risque* de non-atteinte du bon état : ainsi la notion d'*incertitude*, et de *sensibilité* des modèles à ces incertitudes est elle essentielle et inséparable à nos yeux de leur utilisation.
- la capacité cognitive des modèle (être capable de faire comprendre quels sont les processus importants par lesquels les pressions se transforment en impacts, notamment en examinant les conséquences possibles à grande échelle des processus)
- la capacité explicative des modèles (leur capacités à faire communiquer, débattre les acteurs participant aux choix de gestion)
- la capacité fédératrice des modèles (leur capacité à rassembler et consolider des données et des connaissances disparates, d'origine et de nature différente dans un cadre commun cohérent).

On ne peut pas a priori estimer laquelle de ces fonctions est supérieure aux autres. La capacité prédictive peut apparaître comme la plus désirable, mais elle n'est pas forcément la plus souvent disponible, et elle est souvent impossible à prouver rigoureusement (des données fausses combinées à un modèle faux peuvent donner des résultats concordant avec les mesures). Dans certains cas, il sera probablement illusoire d'utiliser des modèles surtout pour leur capacité prédictive (exemple : prévoir quantitativement les concentrations en différents micropolluants dans les eaux souterraines de très grands bassins versants). Ce pourra être alors leur capacité cognitive qui sera utile, par exemple pour aider à différencier quelles sont les actions qui vont dans le bon sens, de celles qui pourraient être contre-productives, car pour discuter des mesures à prendre, il est bon que chacun se soit fait une représentation des phénomènes en jeu sur une base commune.

Par outils de modélisation, nous entendrons principalement un outil de calcul mathématique informatisé, calculant à l'aide d'équations différentielles déterministes l'évolution des variables à représenter dans l'hydrosystème. Nous ne nous limiterons pas pour autant à cette définition, et nous serons amenés à considérer comme tels des outils de calcul pouvant être basés par exemple sur des calculs de flux très simples comme pour le cas du devenir des micropolluants.

différents types de modèles s'appliquant généralement à différents types de masses d'eau (eaux de surface / eaux souterraines), alors que dans le résumé et l'introduction on parlait d'intégration entre biologie et économie. Malheureusement ce terme est très largement utilisé dans les deux contextes, et nous nous sommes pliés à l'usage.

Les modèles ne sont pas pour autant considérés ici uniquement comme des machines numériques produisant des résultats quantitatifs à destination de spécialistes : leur rôle dans la Directive-Cadre deviendra, ne serait –ce que du simple fait de leur existence et leur emploi, plus riche en acquérant des caractères d’outils de communication, de bases de données et de connaissances.

Par contre, nous ne traiterons pas globalement ici des outils d’aide à la décision, qui incluent les modèles au sens où nous l’entendons, mais les dépassent en incluant la dimension économique (fonctions de coût), ou encore des outils tels que l’analyse multicritère. Nous donnerons cependant un aperçu des programmes de recherches européens importants en cours ou récemment achevés sur ce thème (paragraphe 6.3 et Annexe 3).

Sources d’informations.

Les informations sur les modèles utilisés ont été obtenues à l’aide d’une série d’entretiens avec les principaux utilisateurs de modèles pour la gestion des ressources en eau en France (Agences de l’Eau, DIREN), et les concepteurs de ces modèles (Centre d’Etude et de Modélisation de l’Environnement de l’université de Liège, Participation au Colloque 2004 du programme PIREN-Seine, IFREMER) .

Ces entretiens ont été complétés par l’étude des rapports et documents remis par les personnes rencontrées, ainsi que la lecture d’autres documents recueillis suite à une recherche bibliographique. Une liste des références consultées est située à la fin du rapport (Annexe 4).

5. BILAN DES MODELES UTILISES

Le bilan des modèles utilisés par rapport à la DCE doit être fait selon plusieurs logiques, c'est à dire en fonction d'une part des types de masses d'eaux visées (eaux superficielles continentales, côtières, de transition, souterraines) et des différentes catégories de jugement du bon état des milieux aquatiques (quantitatif, physique, chimique, biologique).

Parce que l'activité dans ce champ a semblé plus importante, le bilan est plus développé pour les eaux superficielles continentales que pour les eaux souterraines et les eaux côtières.

5.1 EAUX SUPERFICIELLES CONTINENTALES

5.1.1 Hydraulique, Physico-chimie et phyto/zooplancton.

Actuellement ou à assez court terme, les modèles qui sont utilisés par les Agences de l'Eau traitent globalement des aspects quantitatifs (hydrologique et/ou hydraulique), des aspects physico-chimiques, ainsi que, dans une certaine mesure, du phytoplancton et du zooplancton.

Les outils actuellement utilisés sont les suivants :

- Le modèle Seneque 3 par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, et potentiellement l'ensemble des outils développés dans le cadre du programme PIREN-Seine.
- Le modèle Pegase, par les Agences de l'Eau Rhin-Meuse, Loire-Bretagne, et Adour-Garonne. Les Agences Rhône-Méditerranée-Corse et Artois-Picardie ont également le souhait de se doter de ce modèle
- Le modèle Mosquito, utilisé à l'Agence de l'Eau RMC, mais destiné à être remplacé progressivement par Pegase.
- Le modèle Nopolu, utilisé par l'IFEN et qui pourrait être utilisé par des Agences prochainement en amont du modèle Pegase.

Il apparaît donc que Pegase devrait être à terme utilisé dans l'ensemble des Agences, sauf à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, qui a décidé de s'investir dans l'emploi du modèle Seneque.

5.1.1.1 Le modèle Seneque et les modèles du PIREN-Seine

Bref aperçu des modèles du programme PIREN-Seine

Le programme PIREN-Seine est un programme de recherche interdisciplinaire du CNRS, mené avec le concours financier de la plupart des acteurs publics ou privés de la gestion de l'eau dans le bassin Seine-Normandie (AESN, SIAPP, IIBRBS, DIREN, MEDD, SEDIF,

VNF, SAGEP, Eaux et Force, UNPG, VNF,...). Le PIREN-Seine rassemble des équipes du CNRS, de l'INRA, du Cemagref, du CERREVE et de diverses Universités et Grandes Ecoles.

Son but est de faire progresser la compréhension de l'hydrosystème Seine, en incluant les eaux souterraines, les estuaires et le littoral. Le programme a développé une série d'outils de modélisation regroupés dans une boîte à outils (virtuelle), qui permettent ensemble de modéliser le fonctionnement biogéochimique du bassin.

Les principaux modèles développés sont les suivants :

SENEQUE Modèle du fonctionnement biogéochimique du réseau hydrographique de surface, basé sur une représentation morphologique et hydraulique simplifiée des cours d'eau. Ce modèle est opérationnel sur la quasi-totalité du bassin de la Seine. Il a été également appliqué au bassin de l'Escaut, de la Moselle, et du Danube.

PROSE Modèle de fonctionnement analogue à SENEQUE pour les aspects biogéochimiques, mais plus complet pour les calculs hydrauliques (calculs explicites, possibilité de calculs en hydraulique transitoire). PROSE est opérationnel sur les principaux axes du bassin : Seine, Marne, Oise. Son application à des bassins versants complets est en phase initiale, et il a été utilisé jusqu'à présent sur des tronçons fluviaux ou de petits cours d'eau (Grand-Morin).

MODCOU Modèle hydrologique couplé des écoulements de surface et souterrains, sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie. Ce modèle a également été utilisé sur le Rhône dans le cadre du programme GICC sur le changement climatique.

MODCOU/NEWSAM/STICS

Modèle de transfert des nitrates dans les eaux superficielles et souterraines, couplé avec un modèle agronomique de devenir de l'azote dans les sols agricoles.

L'outil actuellement utilisé par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour les eaux superficielles continentales est le modèle SENEQUE (version 3)

Le modèle SENEQUE

SENEQUE est l'application au bassin de la Seine du modèle « hydrostralher », développé conjointement au début des années 1990 par l'Université Libre de Bruxelles (GMMA) et le laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Jussieu à Paris (Billen G. et al, 1994, 2000). Il a été conçu pour prédire les développements d'algues dans des systèmes hydrographiques.

Hydrostralher est basé sur

- un modèle hydrologique conceptuel classique à deux réservoirs prenant en compte la pluviométrie, l'évapotranspiration, et le stockage temporaire dans le sol et les nappes phréatiques (lesquelles alimentent les eaux de surface).
- La notion des ordres de Strahler, qui permet d'affecter dans le modèle hydrologique précédent les mêmes grandeurs morphologiques à tous les cours d'eau d'un bassin de même degré de confluence (en partant de l'amont). Il s'agit donc d'une représentation conceptuelle et idéalisée du bassin versant.
- un modèle biogéochimique déterministe, lui même résultant du couplage et de l'adaptation de deux modèles développés à l'origine, l'un pour la croissance du phytoplancton en milieu marin (Aquaphy), l'autre représentant la dégradation de la matière organique dans les cours d'eau (HSB). La représentation de la matière organique est nécessaire pour prendre en compte le fait que sa disponibilité peut limiter la croissance du phytoplancton. La croissance du phytoplancton est également contrôlée dans le modèle par le zooplancton présent sur le bassin de la Seine.
- Les contraintes hydrauliques sont identiques et moyennées dans tous les cours d'eau d'un même ordre de Strahler, ainsi que les rejets ponctuels. Par contre, pour les axes principaux, les rejets ponctuels sont considérés individuellement et injectés à leur emplacement réel. Les conditions de températures et d'ensoleillement sont variables dans le temps mais uniformes spatialement.
- Les processus biogéochimiques, qui sont les mêmes dans tout l'hydrosystème, sont caractérisés par des cinétiques (environ 35 paramètres) qui sont déterminées par des observations, mais ne deviennent pas des paramètres d'ajustement du modèle. Une exception est celle des coefficients de Strickler et du modèle hydrologique de base (4 paramètres) pour le calcul des débits, vitesses et hauteurs d'eau, et des paramètres du zooplancton, qui ont été ajustés (environ 5 coefficients) afin de reproduire correctement les fins de blooms algaux. Un autre ajustement par calage est effectué pour les coefficients de transfert de l'azote dans les zones ripariennes. On peut donc dire que le modèle Seneque se caractérise par un recours limité au calage (sauf pour le calcul des concentrations en nitrates résultant des apports diffus).

Le modèle Seneque 3 est le résultat de la construction d'une interface-utilisateur avec l'utilisation de bases de données et des fonctionnalités d'un Système d'Information Géographique. Seneque 3, développé principalement pour les besoins de gestionnaires comme l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, permet de visualiser des données, des résultats de simulations, de définir et piloter le calcul de scénarios de modélisation, dans un environnement de type Windows sur PC, et dans un cadre cartographique.

Les principaux développements en cours sur Seneque sont la mise au point d'une version fonctionnant au pas de temps journalier (actuellement les simulations se font sur un pas de temps décadaire), et l'amélioration de la prise en compte des apports diffus.

Le programme PIREN-Seine a récemment mis en œuvre le modèle Seneque sur les bassins de la Seine en amont de Paris, de la Marne, de l'Oise, et de l'Eure, le modèle Prose sur les axes fluviaux Seine à l'aval de Paris, Marne, Oise et le modèle SIAM de l'Ifremer sur l'estuaire pour couvrir l'ensemble du bassin de la Seine et de son estuaire. Cette chaîne de modèles a été employée pour calculer des scénarios d'évolution de la qualité (physico-

chimie et phytoplancton) des eaux superficielles continentales et de l'estuaire à l'horizon 2015, et évaluer les risques de non-atteinte du bon état écologique (Bacq et al., 2004 ; Cugier et al., 2004 ; Poulin et al., 2004). Ces résultats seront confrontés à une démarche « à dire d'expert » menée par le bureau d'études Ecodecision pour le compte de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Il est prévu d'étendre la démarche jusqu'à l'estuaire par couplage avec un modèle de la baie de Seine.

A cette occasion, le programme PIREN a présenté des résultats de validation du modèle Seneque, qui font apparaître une assez bonne restitution des espèces chimiques azotées, mais moins satisfaisante du phosphore et du phytoplancton (pas de résultats présentés pour la matière organique et l'oxygène) (Bacq et al., 2004).

L'utilisation de SENEQUE à l'Agence Seine-Normandie

L'outil de modélisation Seneque 3 utilisé par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie est développé dans un environnement Visual Basic / Mapinfo. Il est actuellement opérationnel sur le bassin de l'Oise. Il est prévu de l'étendre progressivement aux autres sous-bassins de la Seine, puis aux cours d'eau normands dans une étape ultérieure.

Il est prévu de confier les outils de modélisation à une personne de chaque délégation territoriale de l'Agence, et de fonctionner en client/serveur entre les délégations et le siège de Nanterre.

Jusqu'à présent, cet outil a peu été utilisé de façon opérationnelle. Il devrait être utilisé pour réaliser la vision prospective de l'état des lieux, mais en restant prudent sur l'utilisation des résultats.

Les personnes rencontrées à l'Agence Seine-Normandie ont la perception suivante des avantages et inconvénients de l'emploi du modèle :

- L'avantage principal est la proximité des équipes scientifiques, et donc la facilité d'être en contact avec elles. Le programme PIREN-Seine présente en outre l'intérêt de travailler avec le programme Seine-Aval, ce qui permet de disposer également des outils de modélisation de l'estuaire de la Seine.
- Le fait de disposer d'un module hydraulique propriétaire (fourni avec le modèle), est également intéressant, même si tous les paramètres hydrauliques ne sont pas accessibles aux utilisateurs. La représentation hydraulique de l'hydrosystème est cependant plus simple que celle de Pégase, avec notamment une impossibilité de modéliser des bifurcations.
- La prise en compte des apports diffus, globalisés sur un bassin versant, à partir des données Corine Land Cover a besoin d'être améliorée dans le futur, à la fois en termes de finesse spatio-temporelle, et de représentativité des données d'entrée (des données issues du dernier Recensement Général Agricole (RGA) seraient préférables).

5.1.1.2 Le modèle Pegase

5.1.1.2.1 Description générale du modèle

Le modèle Pegase a été développé dans les années 1990 pour permettre aux administrations belges :

- d'avoir une vision globale de la qualité des eaux à l'échelle de grands bassins versants. L'outil Pegase a dans ce cadre une première fonction de vérification, d'extrapolation et de représentation cartographique des données,
- d'orienter les choix en matière de gestion par la prévision de la qualité physico-chimique et de l'état d'eutrophisation des eaux de surface.

Pegase a été développé en collaboration par trois laboratoires universitaires : le Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement de l'université de Liège, l'Unité d'Ecologie des Eaux Douces des Facultés Universitaires de Namur, et le Laboratoire de traitement des eaux de l'Université Libre de Bruxelles.

Le Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement de l'Université de Liège est une équipe d'ingénieurs qui, dans les développements de systèmes de modélisation de l'environnement, a un rôle d'intégrateur, les autres laboratoires de l'Université de Liège et ceux des autres universités assurant les développements scientifiques et la fourniture des modules de modélisation de base. C'est également ce centre qui gère les relations techniques et contractuelles avec les utilisateurs.

Pegase est constitué de deux principaux modules (Smitz et al., 1997) :

- un module hydraulique et de calcul des températures de l'eau. Les débits des cours d'eau sont d'abord estimés à partir des données disponibles, et calculés en fonction de la surface et de l'altitude des bassins versants. Les largeurs des cours d'eau sont soit connues, soit estimées selon l'approche géomorphologique de Strahler. Les variables hydrauliques (vitesses, hauteurs d'eau) sont ensuite soit calculées par un calcul de ligne d'eau pour les cours d'eau navigables, soit par application de la formule de Manning pour les autres cours d'eau. L'hydraulique est calculée en état stationnaire ou, pour des simulations sur une période de temps, comme suite d'états stationnaires. La représentation d'états hydrauliques transitoires comme les crues ou la gestion d'ouvrages hydrauliques (vidanges de barrages) sortant de ce cadre n'est pas possible.

Les conditions de température atmosphérique, desquelles sont déduites les températures aquatiques par un module de calcul thermique, sont spatialisées de façon simple, en fonction de l'altitude.

- un module de calcul de la qualité physico-chimique de l'eau, et de la dynamique du phytoplancton. Ce module est construit sur les mêmes principes et est très voisin du modèle RIVE (voir description de Seneque ci-dessus). Une différence est que Pegase prend en compte un plus grand nombre d'espèces phytoplanctoniques, ainsi que le compartiment benthique en représentant le phytobentos et certains macrophytes. Par contre, Pegase ne prend pas en compte le zooplancton et les bactéries fécales.

Pegase fonctionne sous station de travail en environnement Unix, et a été interfacé avec le

SIG ArcInfo®, dans lequel sont effectués les prétraitements (saisie des bassins versants, calculs de surfaces, positionnement des rejets par rapport au réseau hydrographique), et les post-traitement (visualisation des résultats de simulation). La représentation des bassins versants est basée sur un modèle numérique de terrain, dont chaque maille délivre une concentration et un débit dans un cours d'eau fictif, qui se jette ensuite dans un cours d'eau réel modélisé.

Une attention particulière est apportée par les développeurs du modèle à l'évolutivité (amélioration continue), la modularité des programmes, et la prise en compte des besoins et des retours d'expérience des utilisateurs (existence d'un Club des Utilisateurs se réunissant tous les deux ans).

5.1.1.2.2 Utilisation de Pegase dans les Agences de l'Eau.

L'Agence Rhin-Meuse a commencé à utiliser le modèle Pesage depuis plusieurs années.

Pegase remplit les fonctions suivantes en relation avec la DCE à l'Agence Rhin-Meuse :

- Caractérisation des milieux (échéance 2004) :

Dans ce cadre, le modèle permet de délimiter plus finement les masses d'eau que des mesures (en effet il fournit une évaluation de la qualité tous les 400 mètres de cours d'eau). Actuellement, 9000 km de linéaire de cours d'eau sont simulés par le modèle, sur les 12 000 km qui rentrent dans le champ de la DCE. Augmenter ce chiffre poserait des problèmes de disponibilité de données, par exemple de débit. Sur le linéaire déjà modélisé, il n'est déjà pas possible de fournir l'ensemble des données de rejet au modèle : on doit se concentrer sur les plus gros rejets industriels, et les principaux rejets urbains (les petites communes ne sont pas prises en compte).

- Evaluation du Risque de dégradation de l'état des masses d'eau en 2015

Dans ce domaine, le rôle de Pegase concerne les paramètres physico-chimiques classiques pour le carbone, l'azote et le phosphore.

Une estimation du risque de non-atteinte du bon état suppose normalement de pouvoir faire des études de sensibilité sur les sorties du modèle, par exemple des analyses de type Monte-Carlo. Dans ce domaine, il semble actuellement difficile de travailler dans cette optique pour l'Agence avec Pegase, étant donné le temps important des simulations et le caractère manuel de leur préparation.

- Détermination des priorités d'intervention

Pegase sera utilisé en support des décisions pour les programmes de mesures, pour fixer les choix dans les filières d'épuration devant être mises en place.

En dehors des stricts besoins relatifs à la DCE, Pegase a déjà été utilisé pour le SAGE Nappe-Rhin.

L'Agence est satisfaite par le modèle, tout en rencontrant quelques limites à son utilisation:

Il n'y a pas de véritable module hydrologique dans le modèle, et il n'est donc pas possible de faire des simulations des pollutions diffuses (ou urbaines-dispersées) par temps de pluie.

Le calcul des apports diffus en milieu non-urbain est empirique et très simplifié, basé sur des corrélations observées en Wallonie entre l'occupation des sols et les concentrations en têtes de bassins, et introduits comme des apports ponctuels dans le réseau hydrographique. Les coefficients sont donc actuellement adaptés à des têtes de bassin soumises à des pressions plus faibles que dans d'autres régions françaises. Par exemple, des modifications des paramètres devront être faites sur des régions comme la Bretagne.

La documentation scientifique de référence du modèle n'est pas assez développée.

L'Agence de l'eau **Loire-Bretagne** a abordé la modélisation de l'impact des rejets d'azote et de phosphore sur les eaux de surface (en termes de physico-chimie et de phytoplancton) dès le milieu des années 1980, avec le développement du logiciel Pollupa par Philippe Crouzet.

Cet outil a notamment aidé à définir la politique de traitement du phosphore de l'Agence. Il a fallu ensuite récemment choisir entre deux modèles : Pegase, alors utilisé uniquement par l'Agence Rhin-Meuse, et le modèle Nopolu (évolution du modèle Pollupa, propriété du bureau d'études Beture).

Après des études comparatives des outils disponibles, et une comparaison approfondie des deux modèles réalisée par le CNRS (Frezouls M. et Dauta A., 1999), le choix s'est porté finalement sur le modèle Pegase, sur la base des constatations suivantes :

- la facilité d'utilisation de Pegase,
- un module biologique de Pegase plus performant,
- un traitement pragmatique de la pollution diffuse dans Pegase,
- l'appui d'une équipe de développement de 10 personnes (Université de Liège), et d'une structure informatique forte
- un système coopératif jugé attrayant : les améliorations du modèle résultant du travail demandé par l'un des utilisateurs sont répercutées gratuitement aux autres utilisateurs.

Le Logiciel Pegase, avant d'être adopté, a fait l'objet d'une adaptation au Cher en 2002. Les résultats ayant été satisfaisant, l'extension à l'ensemble du bassin est en cours. Ce travail d'adaptation comprendra notamment un adaptation des fonctions d'apport diffus au contexte particulier du bassin.

L'Agence **Artois-Picardie** a déjà utilisé Pegase ponctuellement pour l'Escaut et la Lys. L'Agence ne dispose pas de modèle actuellement, mais a l'intention d'acquérir Pegase, notamment en raison de l'expérience probante des autres Agences, de la convivialité de l'outil et des possibilités de traiter à terme avec Pegase des problèmes de métaux lourds.

Jusqu'à présent, à l'Agence de l'Eau **Adour- Garonne** la modélisation avait été utilisée pour des besoins ponctuels, notamment sur la Garonne près de Toulouse, ainsi que sur le Lot, en collaboration avec l'Université de Toulouse.

L'Agence a décidé de se doter du modèle Pegase sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne.

Pegase sera opérationnel en Juillet 2004, et les premières simulations seront effectuées fin 2004. Le modèle ne sera donc pas utilisé pour l'état des lieux pour la Directive -cadre, par contre il sera employé pour le programme d'interventions de l'Agence en 2007, et le programme de mesures pour la DCE ensuite.

Il sera dans un premier temps mis en place sur un réseau hydrographique de base qui sera ensuite étendu. Le Système d'Information Géographique de l'Agence devant être déployé sur tous les postes de travail , il est envisagé que cela soit le cas également pour Pegase.

A l'Agence Adour-Garonne, Pegase est perçu avec les avantages et inconvénients principaux suivants :

Avantages :

La pérennité de l'outil est l'argument majeur dans le choix de Pegase. Grâce à cette pérennité, Pegase pourra assumer un rôle de rassemblement et de consolidation des données. A cet égard, il est positif que toutes les Agences disposent du même outil. . L'ouverture de l'outil : il est ainsi possible d'utiliser le module hydrobiologique développé par l'Université de Toulouse pour le Lot dans le modèle Pegase, en lieu et place du module original développé pour la Belgique. Pour cela, les modalités concrètes d'accès au code de calcul restent toutefois à clarifier avec les propriétaires de Pegase.

Inconvénients : Le traitement de la pollution diffuse est très simplifié.

Le modèle actuellement utilisé à l'Agence **Rhône-Méditerranée-Corse** est un outil développé en interne (Mosquito). Il utilise les données de pression disponibles à l'Agence (données d'autosurveillance pour les plus gros rejets, données forfaitaires pour les autres, et agrégations des données du recensement général agricole 2000 pour la pollution d'origine agricole).

Les paramètres de qualité de l'eau calculés par le modèle sont : DBO, NH₄, Nitrates, Phosphates, et le chevelu hydrographique modélisé est celui de la BD Carthage. Il faut noter que des erreurs de cours d'eau non raccordés et dans les petits cours d'eau côtiers ont compliqué la mise en œuvre du modèle.

Un calage a été réalisé par rapport aux classes constatées du SEQ-Eau, et un accord satisfaisant modèle/observations a pu être obtenu.

Mosquito sera utilisé, avant que l'Agence ne dispose éventuellement du modèle Pegase, avec deux objectifs :

- pour le positionnement des stations des réseaux de mesure pour la surveillance des masses d'eau.
- pour la constitution des plans de gestion.

L'Agence RMC envisage de se doter elle aussi du modèle Pegase. Les avantages de ce modèle, notamment en termes de pérennité et de stabilité, pour le modèle et les données qu'il utilise, sont évidents. Il est cependant clair que l'adaptation de Pegase sur le bassin représenterait un effort très important, pour adapter l'outil aux données disponibles à l'Agence, et pour modifier les modules hydrauliques et hydrobiologiques de Pegase afin qu'ils puissent rendre compte des fonctionnements de territoires aussi divers que les zones méditerranéennes, la moyenne montagne comme le jura, et les torrents alpins.

On peut poser la question de l'intérêt d'un tel investissement dans les modèles, dans la mesure où, Pegase comme d'autres, ne traitent que le cas de la pollution physico-chimique et phytoplanctonique, alors que les enjeux majeurs pour l'application de la Directive, ou pour le contexte du bassin, se situent en termes de qualité biologique, de pollution diffuse d'origine agricole par les pesticides, qui ne sont pas traités par le modèle.

5.1.1.3 Le modèle Nopolu

« Nopolu Système 2 » est une boîte à outils de modèles statistiques, propriété du bureau d'études Beture-Cerec, permettant de calculer des indices de qualité de l'eau, des indices de débits fréquentiels, des bilans d'apports de pollution diffuse agricole.

Les utilisations potentielles du logiciel dans le cadre de la DCE sont les suivantes :

Caractérisation de l'état de masses d'eau :

Nopolu (module « Eurowaternet ») permet de sélectionner, au sein du réseau de surveillance, un sous-ensemble, d'une taille choisie par l'utilisateur, de stations de mesures qui soient représentatives de la qualité des masses d'eau au sens de la DCE. Ce module est utilisé par l'IFEN pour le rapportage auprès de l'Agence Européenne de l'Environnement (dans le cadre de l'alimentation du réseau de données Eurowaternet). Comme le réseau national n'est pas toujours non plus adapté aux besoins du rapportage de l'état des masses d'eau pour la DCE, une utilisation analogue pourrait être faite dans ce cadre.

Cette méthode s'applique uniquement pour l'azote et le phosphore (pas la matière organique). Une méthode analogue a été développée pour traiter le cas des pesticides (Groupe National Connaissance, 2001).

Les règles de sélection des stations prennent en compte les critères suivants :

- La disponibilité des données récentes; qui permet une présélection de stations ;
- L'obligation de choisir un certain nombre de stations dans chaque région,
- La superficie des bassins versants ;

- Le type de pressions humaines auquel est soumis leur bassin versant amont ;
- La prise en compte de la disponibilité de données historiques pour éliminer des stations ayant des valeurs identiques pour les mêmes caractéristiques.

Il est ainsi possible d'étudier l'évolution de la qualité de l'eau en moyennant les observations par typologies de masses d'eau (sur la base des pressions qu'elles subissent : faiblement ou fortement anthropisé, agricole, ...).

Bilans quantitatifs du phosphore et de l'azote sur les bassins versants.

Le module Surplus permet d'effectuer des bilans « entrées – sorties » dans les sols en azote et phosphore, et a été utilisé à plusieurs échelles : dans un cadre national par l'IFEN, dans un cadre européen (Union Européenne) par le Joint Research Center de la Commission Européenne (Terres et al.), et sur l'ensemble du bassin versant Rhin-Meuse (Agence de l'Eau, Diren de Bassin, INRA).

Surplus est uniquement un outil de calcul de flux, qui ne comporte pas de modélisation des phénomènes de transfert ni des processus physico-chimiques. Il n'est donc pas non plus adapté pour effectuer à lui seul des analyses d'impact de scénarios de gestion du territoire ou des nutriments sur la qualité des eaux.

Les données utilisées proviennent principalement, pour le bassin Rhin-Meuse du RGA et de Corine Land Cover. Les résultats de Surplus sur Rhin-Meuse devraient être utilisés pour corriger les coefficients d'apports diffus agricole de Pegase, qui sont actuellement fixés de façon forfaitaire d'après les résultats des études menées en Belgique.

Cet outil est également testé sur le Bassin de la Vilaine (Loire-Bretagne), dans le cadre du projet européen de recherches Euroharp (www.euroharp.org). Un des objectifs de ce projet est d'évaluer et de comparer neuf modèles de calcul des pertes d'azote et de phosphore provenant de sources diffuses vers les eaux de surfaces et les eaux côtières, dans le but de faciliter sur cet aspect la mise en œuvre de la DCE dans l'UE.

Interpolation des indices du SEQ-Eau entre les stations RNB

Le module Linearisation de Nopolu permet de calculer des cartes linéaires de débits statistiques et de classes de qualité selon le SEQ-Eau.

L'application ne s'appuie que sur des données d'observation, en interpolant les valeurs entre deux points de mesure par des fonctions mathématiques simples sans chercher à modéliser des processus (dilution, auto-épuration, sédimentation, etc...). L'interpolation des valeurs de débits se fait de manière linéaire entre deux stations hydrométriques.

Cet outil a été testé par l'IFEN sur le bassin Rhin-Meuse, avec la DIREN de Bassin, pour une utilisation dans le cadre des comptes nationaux de l'eau que doit produire l'IFEN pour l'Agence Européenne de l'Environnement et l'OCDE. Il a été également testé sur des bassins versants en Angleterre et en Slovaquie, dans le même cadre. L'intérêt pour les comptes de l'eau de cette méthode est qu'elle tient compte, dans la caractérisation d'une masse d'eau, de l'importance en termes hydrologiques des différents tronçons de qualité homogène qui la composent.

Une application pour l'établissement de l'Etat des lieux pour la DCE est jugée envisageable par la DIREN de Bassin.

5.1.1.4 Discussion

Dans cette partie, nous analysons les similitudes et les différences entre les modèles Pegase et Seneque. Nous verrons également comment Nopolu et Pegase peuvent être utilisés, et le sont déjà, en complémentarité.

Pegase et Seneque ont en commun une même approche scientifique de la modélisation biogéochimique : celle de l'unité et de la continuité du fonctionnement écologique des hydrosystèmes, au sein desquels les processus biologiques se déroulent de façon identiques en tout point, les réponses différentes suivant le lieu et le temps provenant de la différence des contraintes hydrométéorologiques et des apports.

Ces deux modèles ont également en commun l'essentiel de la représentation des processus microbiologiques de croissance du phytoplancton, et de devenir de la matière organique et des nutriments dans les eaux de surface, qui proviennent de développements effectués à l'Université Libre de Bruxelles. Ces représentations diffèrent toutefois légèrement sur certains points (nombre d'espèces phytoplanctoniques représentées, prise en compte des bactéries fécales par Seneque mais non par Pegase, ...).

Des différences d'approche plus marquées concernent les aspects suivants :

- la représentation des processus hydrologiques et hydrauliques.

Seneque possède un modèle hydrologique, et prend de ce fait explicitement en compte les écoulements superficiels et souterrains dans la formation des écoulements de surface. Cela est utile pour traiter les apports diffus. Par contre, les calculs hydrauliques effectués dans Seneque sont très simples, basés sur des conditions d'écoulement supposées permanentes par périodes de 10 jours. Deux options de calcul sont offertes à l'utilisateur, l'une basée sur un modèle de relation pluie débit, l'autre basée sur une couverture de débits spécifiques reconstitués à partir des chroniques de débits observés aux stations de jaugeages disponibles. La résolution spatiale est elle aussi laissée à la discrétion de l'utilisateur, qui peut soit agréger certains bassins selon une représentation conceptuelle des cours d'eau, dans laquelle tous ceux d'un même ordre de Strahler possèdent les mêmes caractéristiques géométriques et hydrauliques, soit individualiser tous les tributaires. Actuellement, cette seconde approche a été utilisée dans l'application à l'Agence Seine-Normandie. Cette approche pragmatique permet d'aboutir rapidement à une modélisation informatiquement légère de grands bassins versants. Elle n'est pas adaptée pour représenter des phénomènes exigeant une représentation hydraulique fine : travail sur de plus petits bassins versants, travail en hydraulique non permanente (crue et phénomènes de qualité des milieux associés, orages, dynamique des sédiments, ...).

Sur ces aspects hydrauliques, la mise en œuvre du modèle Pégase repose au maximum sur des données réelles (dimensions des cours d'eau, débits, ...) et vise à reproduire la réalité individuelle des écoulements de chaque cours d'eau du bassin.

Cette approche explique en grande partie pourquoi le modèle Pegase tourne sur station de travail et non sur PC actuellement. Par contre, les processus hydrologiques ne sont pas représentés

Pegase est actuellement plus adapté au calculs de situations stationnaires (éventuellement une suite d'états stationnaires), par exemple des étiages caractéristiques, alors que Seneque a pour objectif de simuler des années hydrologiques entières et de restituer la dynamique du phytoplancton sur de longues périodes.

Le modèle le plus complet sur le plan hydraulique est le modèle Prose du Piren-Seine, capable de simuler des phénomènes transitoires, et doté de la capacité à modéliser des phénomènes locaux en 2D, ce qui est utile pour des études locales dans lesquelles on cherche à représenter très correctement l'impact de certains rejets dans la Seine aux endroits où elle comporte des îles. Le modèle Prose, au départ conçu pour simuler la qualité d'un axe fluvial uniquement, évolue actuellement pour devenir un outil fonctionnant sur des bassins versants dans leur ensemble (eaux de surface uniquement).

- la représentation des apports ponctuels (pollution domestique et industrielle).

Seneque, après un travail de conversion de la DCO et de la DBO₅ en variables directement exploitables par le modèle, travaille directement sur des données de rejet communiquées par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

Pegase comprend un module de calcul explicite des rejets domestiques et industriels. Pour les rejets domestiques, dans la mesure des informations disponibles, le modèle calcule la pollution brute générée (sur la base de l'équivalent-habitant) et la pollution nette, c'est-à-dire après perte dans les réseaux et abattement aux stations d'épuration (les taux d'abattement dépendent du type de station, tiennent compte des informations locales disponibles, et sont fixés par défaut en l'absence d'informations). Pour les rejets industriels, les charges sont réparties sur les différentes classes de carbone représentées par le modèle, avec une répartition spécifique à chaque secteur industriel, sur la base d'études réalisées en Belgique.

De plus, lors de l'utilisation pratique qui est faite des deux modèles, les procédures de conversion des données disponibles (de type DCO et DBO₅ pour la matière organique par exemple) en données utilisables par les modèles, ne sont pas les mêmes, ce qui pourrait être une source de divergence entre les deux modèles qu'il faudrait essayer de réduire, pour des raisons de comparabilité et de cohérence des résultats de modélisation sur les différents bassins versants du pays. En Annexe I, nous proposons une comparaison détaillée des équations de conversion utilisées dans deux applications de Seneque (sur l'Oise à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie) et de Pegase (à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse).

- la représentation des apports diffus en milieu rural.

Les deux modèles, qui ne modélisent pas les processus de transfert de polluants diffus (précipitation, interception, ruissellement, écoulement hypodermiques), représentent les apports diffus à l'aide de fonctions d'apport sur chaque bassin versant élémentaire. Ces fonctions d'apport permettent de calculer un rejet ponctuel

unique sur chaque bassin versant élémentaire, supposé équivalent aux rejets diffus sur la zone. Les fonctions d'apport de Pegase et de Seneque prennent toutes deux en compte l'occupation des sols. Par contre, Pegase simule explicitement les rejets issus de l'élevage en prenant en compte les cheptels, et le pourcentage d'exploitations au normes (mais en réduisant leurs pourcentages de rejets directs par rapport aux installations n'étant pas aux normes sur une base fixe et forfaitaire). Seneque prend explicitement en compte l'impact de la fertilisation azotée, ainsi que les effets des zones ripariennes (par un coefficient de transfert ajusté). Les développements en cours sur les deux modèles font qu'ils devraient rapidement converger vers des représentations très proches des apports de pollution diffuses (travail sur Seneque sur les apports par l'élevage en cours, travail sur Pegase sur les surplus en cours).

Il faut signaler dans ce domaine une complémentarité intéressante entre Pegase et Nopolu : ce dernier outil est utilisé pour améliorer les fonctions d'apport diffus de Pégase.

En conclusion,

Les outils qui seront utilisés par les Agences de l'Eau pour l'étude de la qualité physico-chimique, du phytoplancton, des macrophytes et du phytobenthos³, ont globalement les capacités de caractériser des états des masses d'eau selon les critères quantitatifs et de qualité physico-chimique retenus par la DCE. Pour la qualité biologique et sa réponse aux modifications physico-chimiques et hydromorphologiques, il ne répondent que très partiellement, à travers le phytoplancton, à la question posée. (Plus de détails sur cette dernière affirmation se trouvent dans la partie 5.1.2).

Globalement les deux modèles (Seneque et Pegase) utilisés par les différentes Agences à terme seront très proches dans leur conception et leur fonctionnement. Les principales différences entre Pégase et Séneque, sont les indications d'une complémentarité qui milite pour des échanges techniques entre les développeurs et les utilisateurs des deux modèles, et elles démontrent l'intérêt d'utiliser au moins deux modèles différents pour la gestion des ressources en eau en France :

- Pegase est plus adapté dans sa conception au calcul spatialisé de l'état de l'hydrosystème dans une situation de hydraulique donnée (type étiage de référence), alors que Seneque est à l'origine conçu pour calculer l'évolution dynamique du phytoplancton et de la qualité sur une année entière. Donc le premier est plus tourné vers la caractérisation quantitative de la qualité de l'eau, et le second vers la compréhension des grands mécanismes hydrobiochimiques à l'échelle des bassins versants.
- La diversité des approches est également rendue nécessaire par le besoin d'adapter Pegase à la diversité des contextes hydrauliques et écologiques qu'il rencontrera sur les bassins RMC et Adour-Garonne, ce qui sera possible grâce à la structure ouverte du modèle, dans lequel des modifications spécifiques peuvent être introduites (par exemple, des modifications au module hydrobiologique de Pegase seront faites à l'Agence Loire-

³ Pour les invertébrés benthiques, ces modèles ne sont pas adaptés et ce n'est pas leur objectif, même si les espèces les plus impliquées dans le broutage du phytoplancton sont représentées.

Bretagne suite à des collaborations avec l'Université de Tours, et de même à l'Agence Adour-Garonne suite à des collaborations avec l'Université de Toulouse).

Dans le même temps qu'une diversité des approches est souhaitable, la cohérence maximale doit être recherchée lors de l'adaptation des données aux modèles. En effet, les modèles comme Seneque ou Pegase demandent de très grandes quantités de données (rejets, occupation des sols, ...), dont une partie importante est souvent absente et doit alors être estimée sur la base d'hypothèses. Il est important que ces hypothèses faites, par exemple, sur les rejets effectivement pris ou non-pris en compte, sur les fonctions de conversion des fichiers de rejets des Agences, soient cohérentes entre les différents bassins, afin de savoir si les différences observées dans les résultats de simulation proviennent bien de différences de fonctionnement de ces bassins. Une mise en regard des modalités de prise en compte des rejets dans Seneque et Pégase est proposée en Annexe 1.

Les modèles doivent être utilisés pour évaluer les *risques* de non-atteinte du bon état écologique. Il est donc important de pouvoir évaluer l'incertitude associée à leurs résultats. Des calculs d'incertitude sont très rarement menés dans les applications faites de ces modèles jusqu'à présent, mais ils semblent indispensables dans les années à venir si l'on veut connaître le poids à donner à leurs résultats numériques lors des prises de décision futures.

Même si une majeure partie des paramètres des modèles ne sont pas calés, ce qui fait leur intérêt, il sera nécessaire également de disposer, avant leur emploi pour la construction de scénarios de programmes de mesures, d'une vérification de leur capacités prédictives sur des jeux de données n'ayant pas été utilisés pour leur calage.

Enfin, sur le bassin Seine-Normandie, une convergence entre les modèles Prose et Seneque permettrait d'associer leurs avantages respectifs (hydraulique pour Prose, biogéochimie pour Seneque).

5.1.2 Modélisation de l'état écologique.

La prévision de l'impact de mesures de réduction de rejets ou d'aménagements du territoire sur l'état écologique des eaux est loin d'être complètement prise en charge par les modèles décrits dans la section précédente.

Deux aspects en particulier posent un problème scientifique délicat à résoudre : la prise en compte de l'hydromorphologie et de la qualité chimique du cours d'eau comme une des contraintes influençant la réponse du milieu, et le calcul de cette réponse en termes de populations piscicoles, au-delà du phyto et du zooplancton.

Ainsi que précisé dans l'Annexe V (section 1.2.1) de la DCE, l'état des masses d'eau comprend leur état hydromorphologique, apprécié en fonction des trois critères suivants :

- le régime hydrologique (degré de perturbation de la connexion des eaux de surface avec les eaux souterraines, et de la quantité et la dynamique des débits)
- la continuité du cours d'eau (degré de perturbation de la migration des organismes aquatiques et du transport des sédiments)
- les conditions morphologiques du cours d'eau (degré de perturbation de l'état des rives, du substrat du lit, des conditions d'écoulement).

Le bon état hydromorphologique est caractérisé par des valeurs des trois critères ci-dessus qui permettent d'atteindre le bon état écologique.

Une première catégorie d'outils de diagnostic simples, pouvant être utiles dans ce cadre est illustrée par le modèle Qualphy de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (voir Annexe 2, et Mazuer P. et Matte J.L., 2001). Il s'agit d'un logiciel simple, qui permet de calculer des indices de l'état physique des milieux, en prenant en compte des critères du type de ceux définis par la DCE. Qualphy pourrait préfigurer ce que serait un futur « SEQ-Physique ». La difficulté réside dans le fait que de tels outils caractérisent le milieu physique, mais qu'ils établissent difficilement un lien entre qualité physique et état écologique (hormis quelques liens simples comme la franchissabilité piscicole).

Les outils de modélisation hydrobiogéochimiques décrits à la section précédente pourraient en théorie permettre d'analyser ce lien entre hydromorphologie et chimie du cours d'eau et bon état écologique, au moins en ce qui concerne les phytoplancton et le zooplancton.

Cependant, le modèle Seneque travaille à grande échelle, et sa représentation hydraulique et morphologique des cours d'eau semble trop idéalisée pour remplir de telles fonctions.

Le modèle Prose du Piren-Seine permettrait des analyses locales (ex. : cas du Grand-Morin sur le bassin de la Marne), avec la limitation du fait qu'il ne traite pas le transport des sédiments, et que sa mise en œuvre sur l'ensemble du territoire d'une Agence paraît beaucoup trop lourde pour être engagée. Un outil combinant les avantages de Prose et Seneque serait utile de ce point de vue.

Pegase a l'intérêt de comprendre une modélisation des macrophytes, mais uniquement dans sa version stationnaire actuellement, et dont la capacité prédictive sur ces populations doit encore être vérifiée. La finesse de représentation morphologique dans Pegase n'est pas non plus adaptée à la représentation de l'impact hydromorphologique sur la biologie.

Il manque en outre, pour faire le lien entre les modèles biogéochimiques précédents et des modèles d'écotoxicité (incluant les fonctions dose/réponse) sur les populations de poissons ou d'invertébrés, une évaluation de la biodisponibilité des polluants au sein des modèles biogéochimiques (Wasson et al, 2003), et cette perspective semble encore assez lointaine.

Les modèles biogéochimiques ne sont donc pas aujourd'hui capables, dans la perspective des programmes de mesures de la DCE, d'être des outils opérationnels prédictifs pour évaluer différents programmes alternatifs du point de vue de leur impact sur l'état écologique. Ils pourront cependant donner quelques réponses locales ou partielles.

Des réponses plus satisfaisantes, à cette question du lien entre morphologie, qualité chimique et état écologique commencent cependant à voir le jour. Elles se basent sur la vision du poisson comme témoin et intégrateur du fonctionnement écologique du cours d'eau :

- les modèles d'habitats piscicoles, notamment ceux développés par le Cemagref, ont pour objectif d'expliquer (par des modélisations déterministes ou statistiques) les réponses des communautés piscicoles à des changements de régimes hydrologiques et de caractéristiques morphologiques des cours d'eau.

Ainsi le modèle EVHA du Cemagref⁴ (centre de Lyon) couple un modèle

⁴ Développé avec le soutien financier du MEDD

hydraulique avec un modèle de préférence des espèce aquatiques pour les conditions hydrauliques locales. Le comportement des individus est extrapolé à l'échelle des populations de poissons (principe des « micro-habitats »). Ce modèle a été utilisé dans de très nombreuses études locales d'impact d'aménagement. Il ne semble pas avoir été utilisé pour l'ensemble de grand bassins versants, et la validité de ses prévisions à grande échelle avec des données beaucoup plus imprécises n'est pas acquise.

Le Cemagref a également développé un modèle simplifié (Estimhab), nécessitant moins de données. Mais ce modèle reste adapté à des calculs sur des tronçons de cours d'eau à la morphologie naturelle ou peu modifiée. Son utilisation dans le cadre de grands bassins versants ne semble pas non plus envisageable à moyen terme.

Des approches analogues utilisant des représentations hydrauliques très simplifiées (nombre de Froude et de Reynolds) sont également développées.

- Le Cemagref (centre d'Antony) réalise également des travaux de modélisation dans le cadre du programme Piren-Seine, avec pour objectif de calculer sur l'ensemble du bassin versant Seine-Normandie les probabilités de présence ou d'absence de différentes espèces de poissons (PIREN-Seine, 2002).

Ce type de modélisation statistique (basée sur la méthode des arbres de décision) reconnaît l'importance des facteurs morphologiques et hydrauliques pour la présence de populations piscicoles, mais son intérêt est d'intégrer d'emblée d'autres facteurs comme la qualité de l'eau (rendant possible un couplage avec des outils comme Seneque ou Pegase). Il s'agit pour l'instant de développements au stade de la recherche, et les premiers résultats ne sont qu'illustratifs. Ils montrent cependant dès le départ des possibilités d'application de la méthode à la gestion dans le cadre global et à grande échelle de la DCE.

Des travaux analogues ont été menés sur des fleuves en France par une équipe du Muséum d'Histoire Naturelle, notamment sur la Garonne.

5.1.3 Modélisation des transferts de micropolluants et de substances prioritaires dans les eaux de surface.

On examine ici le cas des polluants inorganiques (essentiellement les métaux), et des polluants organiques considérés individuellement (substances prioritaires au sens de la DCE, pesticides, ...).

Métaux

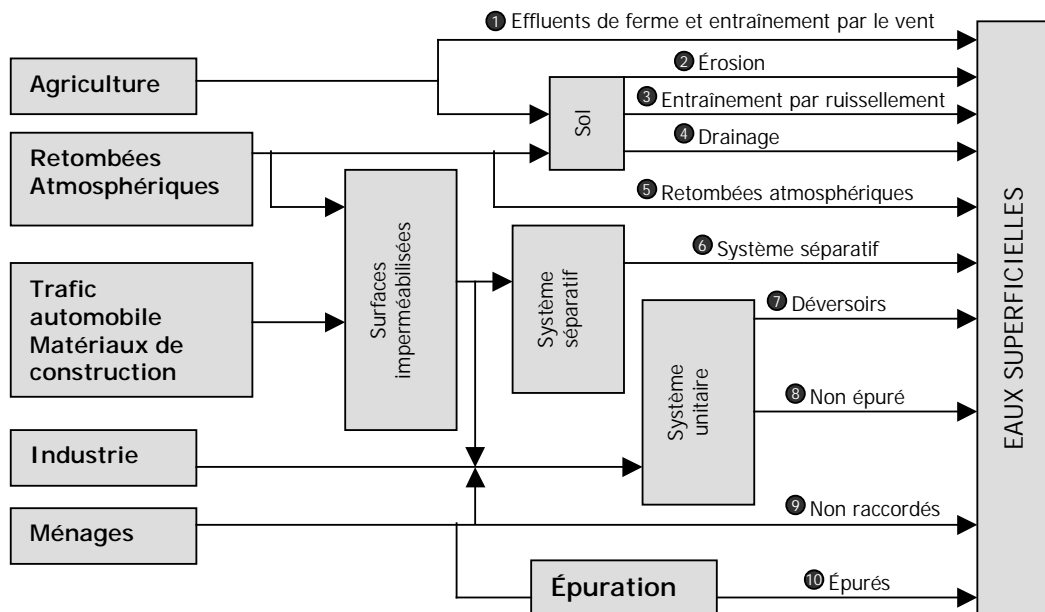
L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, a adapté au bassin Rhin-Meuse un modèle d'évaluation qualitative et quantitative des apports diffus développé dans le cadre de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) (Rémillon, 2003). Ce modèle se limite à l'étude des apports diffus des métaux lourds vers les eaux superficielles, sans traiter leur devenir dans les eaux de surface (il n'y a pas en particulier de calculs de concentrations prévisibles dans la colonne d'eau ou dans les sédiments). Les rejets ponctuels (stations d'épurations, rejets industriels), sont donc exclus.

7 métaux lourds ont été retenus lors de l'élaboration du modèle. Il s'agit du mercure, du cadmium, du cuivre, du chrome, du zinc, du plomb, et du nickel. Parmi ces métaux, le mercure et le cadmium font partie des substance prioritaires dangereuses au sens de la DCE, le nickel est une substance prioritaire et le plomb une substance prioritaire susceptible d'être classée à l'avenir comme prioritaire dangereuse. Le zinc, le cuivre et le chrome ne sont pas pris en compte dans le cadre de la DCE, néanmoins ils sont mentionnés dans le programme d'action de la CIPR.

Le modèle prend en compte dix voies d'apport (cf schéma de principe infra), et est basé sur l'application de facteurs d'émission (par exemple, concentrations de fumiers de bovins en métaux), et de coefficients de transfert de flux (par exemple, taux de transfert des métaux contenus dans les fumiers vers les eaux superficielles). Seuls les apports imputables aux activités anthropiques sont comptabilisés.

Ce modèle peut être mis en œuvre sur des territoires d'échelles variées comme les territoires élémentaires, les secteurs de travail, les districts hydrographiques ou encore le bassin entier. Il a été choisi d'effectuer les calculs par territoire élémentaire de manière à ensuite pouvoir les sommer sur les secteurs de travail de la DCE.

L'Agence a également réalisé une prospective des apports diffus à l'horizon 2015. L'outil sera utilisé pour fixer les priorités d'action sur le cadmium et sur le mercure



Principales sources et voies d'apport diffus de métaux vers les eaux superficielle (extrait de Remillon, 2003)

Cet outil peut également, par différence entre apports totaux et apports parvenant aux eaux superficielles, fournir une estimation des quantités maximum qui peuvent théoriquement rejoindre les eaux souterraines.

Sur le **bassin Seine-Normandie**, le programme Piren-Seine étudie depuis plusieurs années les origines et les processus de la contamination métallique des effluents urbains, des eaux superficielles et des sédiments. Avec l'objectif de fournir un outil de gestion pour l'application de la DCE, le programme Piren-Seine a débuté la construction d'un outil

informatique baptisé Sequamet (Thibert et al., 2004). Se présentant d'emblée sous la forme d'un outil opérationnel et convivial d'un point de vue informatique, il associe des bases de données sur l'état de la contamination et les rejets (notamment les données de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie), des outils de calcul des transferts, et un système d'informatoin géographique.

L'objectif du système est également de calculer des concentrations « bruit de fond » pour les métaux sur l'ensemble du bassin. Sequamet prend en compte l'ensemble des sources (diffuses et ponctuelles, anthropiques et naturelles), et représente les transferts dans l'hydrosystème en prenant en compte la topographie et l'hydrologie. C'est donc un outil beaucoup plus complexe et ambitieux que celui utilisé par l'Agence Rhin-Meuse. S'il est disponible dans l'ensemble de ses fonctionnalités aux dates requises par les échéances de la DCE, cet outil pourra contribuer à examiner les conséquences en termes de contamination métallique de différentes options de gestion du bassin.

Enfin, l'équipe de développement du modèle Pégase développe actuellement un module pour calculer le transfert des métaux.

En résumé, il est envisageable de pouvoir, sur certains bassins disposer d'outils d'aide à la décision pour la réalisation des programmes de mesures dans le cadre de la DCE pour 2009. Les deux outils précédemment décrits en offrent deux exemples, le premier simple et déjà opérationnel, le second plus ambitieux. Cependant, si ces outils peuvent peut-être devenir opérationnels pour ce qui est de fournir des estimations de flux (voire de concentrations), ils ne seront pas capables de fournir des indications en termes d'effets de la pollution métallique sur l'état écologique : il faudrait pour cela disposer de résultats trop précis par rapport à l'objectif de ces modèles de flux, et également pouvoir modéliser la biodisponibilité des polluants, ce qui paraît hors d'atteinte actuellement à l'échelle de grands bassins versant.

Ajoutons que la pollution par les métaux risque de poser dans certains bassin versants des difficultés d'atteinte du bon état écologique, en raison d'une contamination des sédiments (cas du bassin du Lot dans le bassin Adour-Garonne, en raison d'une contamination par le Cadmium). Dans ce type de cas, des outils de modélisation capables de représenter le devenir des métaux sur le long terme, notamment à travers le transport des sédiments jusque dans les estuaires, pourraient être utiles, même si la modélisation de l'impact de la pollution sur l'état écologique n'était pas possible.

Micropolluants organiques et pesticides.

La modélisation prédictive du transfert des micropolluants organiques dont les pesticides vers les eaux de surface est un exercice très difficile dans la mesure où on cherche à représenter le devenir de quelques pourcents des substances manipulées. Elle implique une représentation hydrologique très précise du bassin versant, et suppose une connaissance très précise de la nature du sol, à la fois physique (écoulements préférentiels par les macropores du sol par exemple) et biologique (action des différentes communautés microbiennes sur les substances étudiées, interactions très importantes et complexes avec les différentes classes de matière organique des sols).

Pour ces raisons, des scientifiques impliqués dans la construction de ces modèles doutent de leurs capacités prédictives et leurs attribuent plutôt une vertu pour comparer

qualitativement le comportement de plusieurs molécules par exemple, et estiment qu'ils ne sont pas aptes à simuler l'impact de différentes options d'aménagement du territoire (ECRIN, 2002).

Jusqu'à présent, ce type de modèles n'est mis en œuvre que sur des bassins versants de dimensions très réduites, et sur lesquels il est déjà très difficile de les valider. Par exemple, les modèles actuellement mis en œuvre dans le programme PIREN-Seine concernent un bassin de quelques kilomètres carrés (Blanchoud et al., 2004).

Il est prévu d'étendre ces modèles à terme à l'ensemble de la Marne, en s'appuyant sur la base hydrologique du modèle Seneque pour le transfert vers les eaux de surface (et également d'autres modèles pour le transfert vers les eaux souterraines). La faisabilité d'un modèle prédictif validé à cette échelle est toutefois loin d'être acquise.

L'équipe de développement du modèle Pegase développe actuellement un système de modélisation intégré couplant hydrologie détaillée, modélisation des sols et du sous-sol, capable de modéliser le transfert vers les eaux de surface de substances prioritaires, et de phytosanitaires. Les mêmes réserves peuvent être faites quant à l'utilisation de tels outils à grande échelle à des fins prédictives : leurs besoins en données sont très importants, et les résultats opérationnels pour l'aide à la décision risquent d'être décevants.

Une difficulté supplémentaire réside dans la multiplicité des produits phytosanitaires et la spécificité du comportement de chacun dans l'environnement : il est ainsi en général impossible d'utiliser un modèle qui serait validé sur une molécule pour une autre sans procéder à une nouvelle validation.

Signalons également que la représentation des apports atmosphériques, à certaines échelles, et dans certaines régions, et pour certaines molécules pourrait s'avérer nécessaire.

Enfin, comme pour les métaux, des modèles de transfert des substances dans l'environnement risquent de ne pas être capables d'évaluer l'impact des concentrations en micro-polluants sur l'état écologique des masses d'eau. En effet, on ne pourra utiliser à la suite de ces modèles de transfert que des outils très simples d'un point de vue écologique, comme par exemple la comparaison de concentrations calculées par les modèles avec des PNEC, sans tenir compte par exemple des questions de biodisponibilité des polluants, de bioaccumulation,

Sur ce sujet, il faudra donc définir une stratégie d'emploi des modèles tenant compte de ces limites avant de s'engager dans l'acquisition ou le développement d'outils sophistiqués à des fins de gestion.

5.2 EAUX SOUTERRAINES

Pour la DCE, la qualité des eaux souterraines est à analyser selon deux dimensions : la quantité et la qualité.

Pour les **aspects quantitatifs**, l'Annexe V (section 2.1.2) précise que l'on doit entendre le bon état quantitatif, à la fois comme la stabilisation du niveau des eaux souterraines, mais aussi que ce niveau ne doit pas être tel qu'il empêcherait d'atteindre le bon état des eaux de surface.

En matière de modélisation, cela implique le recours éventuel à des modèles

hydrodynamiques capables de représenter les échanges entre les eaux souterraines et les eaux superficielles, c'est à dire le couplage entre des modèles hydrologiques et des modèles représentant les écoulements souterrains.

Le couplage peut être fait « manuellement » entre un modèle hydrologique d'une part et un modèle sous-sol d'autre part, ou encore il existe (en nombre assez restreint) des modèles mathématiques totalement couplés (l'un des plus connus étant le logiciel MIKE-SHE du Danish Hydraulics Institute, avec de nombreuses références à son actif dans le monde, mais peu utilisé en France⁵). Des couplages sont également réalisés dans le cadre du programme Piren-Seine (voir ci-après le paragraphe sur la qualité des eaux souterraines), et le Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement de l'Université de Liège, qui a développé Pegase, développe actuellement un système de modélisation couplée qui devrait être apte à fonctionner en 2005.

En France, le BRGM, des bureaux d'études, effectuent régulièrement des études quantitatives sur les aquifères, mais les interactions hydrauliques avec les eaux de surface sont peu traitées à grande échelle, notamment parce que cela est coûteux en termes d'acquisition de données et de temps.

Les Agences de l'Eau n'envisagent pas de se doter de ce type d'outils, mais plutôt de les faire utiliser en cas de besoin par des spécialistes, comme cela est déjà le cas (exemple de l'étude la nappe d'Aquitaine à l'Agence Adour-Garonne, de la nappe de l'Albien sur le bassin Seine-Normandie, ...).

L'étude de la nappe de l'Albien dans le cadre du SDAGE Seine-Normandie montre un exemple dans lequel la faisabilité et les limites quantitatives des règles de gestion susceptibles d'équilibrer les usages ont pu être fixées grâce à la construction d'un modèle de simulation du système aquifère.

Le modèle MODCOU du Piren (qui ne simule pas les eaux souterraines) a été utilisé seul pour comparer l'alimentation des nappes souterraines du bassin Seine-Normandie, avec les prélèvements qu'elles subissent, et ainsi faire une première évaluation du risque de non-atteinte du bon état quantitatif (Dessevre et al., 2004). Cet exemple montre, un peu à l'inverse du précédent qui concernait une nappe profonde et captive, qu'il n'est pas forcément nécessaire de mettre en œuvre une chaîne de modèles complète pour obtenir des résultats exploitables dans le cadre de la réalisation des états des lieux pour la DCE. Il est ainsi possible d'effectuer avec une modélisation « allégée » des bilans recharge/prélèvements. Evaluer l'efficacité de programmes de mesure à l'aide de modèles nécessiterait par contre de recourir en plus à de véritables modèles hydrodynamiques souterrains pour calculer les réponses hydrodynamique des aquifères.

En matière de **qualité chimique des eaux souterraines**, les questions les plus significatives sont les suivantes :

- les pollution historiques suites à des pollutions accidentelles ou des pollutions de sols
- la pollution des eaux souterraines par les nitrates d'origine agricole

⁵ Signalons toutefois l'importante étude de l'aval et de l'estuaire de la Loire, mais ce sont plus les fonctionnalités de dynamique des sédiments en écoulements de surface qui sont utilisées dans ce cadre. Voir sur cette étude § 5.3 et <http://www.loire-estuaire.org>

- la pollution des eaux souterraines par les produits phytosanitaires d'origine agricole.

Concernant la pollution des eaux souterraines suite à des pollutions de sols, il s'agit de phénomènes en général locaux, sauf si cette contamination s'étend dans des aquifères depuis longtemps, ou si elle a un impact sur les eaux superficielles. De nombreuses études sont réalisées en France avec l'aide d'outils de simulation (BRGM ; Burgeap, ...).

Pour la pollution des eaux souterraines par les nitrates d'origine agricole, le problème se pose par contre à grande échelle, et la modélisation se révélant plus complexe, les expériences en la matière sont encore rares.

Le programme Piren-Seine développe depuis plusieurs années sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie une chaîne de modèles pour simuler la propagation et la transformation des nitrates lors du ruissellement, de l'infiltration, du transport en zone non saturée (premiers horizons de sol) puis du devenir dans les aquifères. Cette chaîne comprend un modèle agronomique (STICS) fournissant les flux d'azote, couplé à un modèle représentant le ruissellement et l'infiltration (MODCOU), qui transmettent des concentrations aux modèles NONSAT et NEWSAM, qui modélisent le transfert dans la zone non-saturée et les aquifères. Il s'agit encore d'un outil prototype, des développements et des phases de test et de validation sont encore nécessaires avant son emploi comme outil de gestion. Il est également envisagé de coupler cette chaîne de modèles au modèle Seneque, afin de mieux y représenter les flux d'azote. Une limite aux performances finales de l'ensemble de modèles surface/souterrain ainsi formé sera le fait qu'on couple des modèles véritablement spatialisés (souterrain) à un modèle hydrologique de surface idéalisé (Seneque).

Pour les produits phytosanitaires, il est nécessaire de modéliser le continuum sol – zone non saturée – zone saturée, ce dont peu de modèles sont capables actuellement. Les réserves faites plus haut dans ce rapport sur la faisabilité de modèles prédictifs du transport de produits phytosanitaires en surface sont encore plus valables pour les eaux souterraines, puisque la complexité et les incertitudes sont encore augmentées.

Les modèles qui ont été utilisés jusqu'à présent en France l'ont été à notre connaissance sur de petits bassins versants. Dans le cadre du projet européen Pegase de recherche sur ce thème de la modélisation en eau souterraine des phytosanitaires, dans lequel le modèle Marthe du BRGM est impliqué (www.brgm.fr/pegase), les bassins versants étudiés sont au plus de l'ordre de 50 km².

Le programme Piren a pour objectif de développer sur l'ensemble du bassin de la Marne un modèle couplé eaux de surface / eaux souterraines. Une modélisation est en cours de réalisation dans un premier temps sur un sous-bassin, la Vesle (1500 km²) (Rat et al., 2004). Ce modèle simulera des processus de transformation simples pour être adaptable à plusieurs molécules et prendra en compte les apports atmosphériques.

Enfin, le système de modélisation couplée sols/souterrain développé par le Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement de l'Université de Liège a pour objectif de modéliser le transfert de nitrates et de pesticides vers les eaux de surface et les eaux souterraines sur de grand bassins versants (avec notamment la mise en place d'un architecture informatique – modules de calcul fonctionnant en parallèle – permettant des

calculs très rapides sur une station de travail).

5.3 EAUX COTIERES ET LITTORALES

Le Programme LITEAU

Le programme LITEAU est un programme de recherche sur le littoral financé par le MEDD.

Ce programme a pour objectif essentiel de fournir des outils scientifiques d'aide à la décision, pouvant revêtir des formes diverses, des plus simples (recommandations plus ou moins paramétrées avec leurs tables de références pour les utilisateurs, guides méthodologiques), aux plus complexes (modèles numériques autorisant la simulation des conséquences, à court ou moyen terme, des diverses politiques envisagées et associant éventuellement des systèmes experts). Il s'agit de développer des modes de représentation et de simulation adaptés aux besoins des gestionnaires, priorité étant donnée aux outils socio-économiques. Une partie importante de l'effort à engager doit porter sur la remise en perspective et l'articulation de connaissances existantes, acquises pour l'instant de façon parcellaire à l'intérieur de différents champs disciplinaires (physique, biologie, socio-économie...).

Trois axes de recherche ont été définis :

1. Gestion des apports, y compris par les cours d'eau, et de leurs impacts sur les milieux
2. Gestion des milieux littoraux
3. Gestion des usages et développement durable

Dans le cadre de ce programme, des modèles ont été mis en place notamment

- des modèles de simulation de l'impact morphologique sur la côte de variantes d'aménagement,
- sur l'estuaire de la Gironde, pour évaluer les flux de polluants métalliques et organiques,
- sur le bassin et l'estuaire de la Seine, en collaboration avec le programme Piren-Seine, des simulations du développement phytoplanctonique selon différents scénarios d'apports par le bassin versant ont été effectuées, en associant le modèle Seneque du Piren et un modèle de la Baie de Seine de l'Ifremer. Dans le cadre du programme Liteau 2, cette modélisation sera étendue à l'ensemble du littoral français de la Manche et de la Mer du Nord, en modélisant les apports des bassin versants de la Somme et de l'Escaut avec le modèle Seneque.

Des associations entre le modèle Rive (module des processus biogéochimiques du modèle Seneque) et un modèle de milieu estuarien ont également été effectués sur le bassin du Rhône et le Golfe du Lion.

La similarité entre le modèle Rive et le module correspondant du système Pegase permet de penser que ce dernier modèle pourrait sans difficulté particulière être associé également dans le futur à des modèles en milieu littoral/estuaire.

Les modèles sont également utilisés dans un but de compréhension des phénomènes, de prospective, et d'évaluation de l'efficacité de différentes actions possibles sur les questions d'envasement, d'intrusion saline, et de baisse de lignes d'eau sur la Loire Avale et son estuaire. Le logiciel utilisé est le logiciel MIKE 11, du Danish Hydraulics Institute,

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 INTERET ET LIMITES DES MODELES POUR LA DIRECTIVE-CADRE

Au début de ce rapport, nous avons évoqué plusieurs intérêts potentiels des modèles :

- la capacité prédictive, notamment la prévision d'un *risque* de non-atteinte du bon état.
- la capacité cognitive des modèle (être capable de faire comprendre quels sont les processus importants)
- la capacité explicative des modèles (leur capacités à faire communiquer, débattre les acteurs participant aux choix de gestion)
- la capacité fédératrice des modèles (leur capacité à rassembler et consolider des données et des connaissances).

Après avoir passé en revue les modèles actuellement utilisés pour la DCE, et ceux qui le seront probablement prochainement, et après avoir recueilli les avis d'experts et d'utilisateurs de ces modèles, nous proposons dans le tableau qui suit une évaluation qualitative de l'intérêt de la modélisation au regard de ces quatre critères, pour quelques-uns des problèmes de « bon état » examinés dans cette étude. Il ne s'agit pas d'une évaluation de performance des modèles (qui exigerait une étude plus approfondie, à l'aide de tests), mais d'adaptation par rapport à ce que des décideurs peuvent en attendre à priori.

	Prédictif	Cognitif	Explicatif	Fédérateur
Eaux superficielles (biogéochimie)	++	+++	+++	+++
Eaux superficielles (micropolluants)	-	+	++	++
Eaux superficielles (biologie)	+	+	++	++
Eaux souterraines (quantité)	++	+	++	++
Eaux souterraines (nitrates, pesticides,...)	-	++	+	+
Littoral, Estuaire	+	++	+	+

Quelques commentaires généraux sur cette vision très synthétique, et forcément simplificatrice :

Capacité prédictive et incertitudes des résultats des modèles

D'une façon générale, la capacité prédictive des modèles n'est pas leur intérêt majeur : certains ne sont pas capables de prévoir correctement la réponse des milieux à des changements de contraintes, pour d'autres cette capacité n'a pas été véritablement évaluée, et pour les autres, elle est correcte mais moyenne. Enfin, pour l'ensemble des modèles, ils ne sont pas en l'état faits pour prédire des risques de non-atteinte, qui supposent d'aller au-delà de simulations isolées de la réponse à quelques jeux de contraintes, si l'on veut réaliser de véritables calculs d'incertitude.

On ne dispose pas aujourd'hui des outils opérationnels (les modèles et/ou le temps à y consacrer pour les utiliser de façon très intensive) pour effectuer une véritable analyse de risque (probabiliste) de non-atteinte du bon état de masses d'eau. Il y a donc un choix à faire : soit faire un effort pour en disposer (mais surtout sans se dispenser pour autant des jugements d'experts), soit accepter une définition affaiblie du mot « risque » qui deviendrait plutôt « éventualité » de non-atteinte, jugée sur la base des données, modèles et jugements d'experts.

Pour illustrer le propos, imaginons qu'on utilise des modèles pour choisir le niveau d'épuration en 2015 du parc d'épuration sur un bassin versant :

- Dans le premier choix, on simule idéalement un très grand nombre de scénarios possibles pour l'épuration, et on évalue la sensibilité du modèle à l'ensemble des paramètres et des données par des méthodes stochastiques. Puis on observe la distribution des probabilités de réponse du milieu aux variables de décision (c'est à dire dans notre exemple les niveaux de traitement).
- Dans ce second choix, les modèles sont utilisés uniquement pour faire des simulations ponctuelles proposées par des experts, et aider à comprendre et communiquer les enjeux, y compris illustrer les incertitudes.

Le second choix est probablement le plus raisonnable et pragmatique, mais dans tous les cas il nous semble très important que les modèles servent à révéler les incertitudes que doit gérer la prise de décision, et non à les cacher. En effet, les incertitudes cachées peuvent être la source de décision coûteuses et peu efficaces voire contre-productives, alors que leur connaissance permet, non pas de ne rien faire sous prétexte d'incertitude, mais d'orienter les choix vers les actions qui sont les plus « robustes », celles qui donnent de meilleurs résultats dans tous les cas de figures, même si la réalité se révèle plus tard être différente des projections ou des hypothèses qui avaient été faites.

Les capacités d'explication (notamment la réalisation d'interfaces performantes pour communiquer les résultats des modèles), et de fédération des données (construction de bases de données structurées et pérennes) sont globalement plus avancées pour les eaux de surface grâce à des outils comme Pegase et Seneque qui sont devenus des outils de gestion et donc en particulier de gestion des données. Ces capacités, avec en outre l'intérêt scientifique (pour tester des hypothèses et faire progresser les connaissances, montrer leurs limites) sont à notre avis le meilleur atout et une raison suffisamment forte pour recourir à l'emploi de modèles malgré leur relative faiblesse en matière de capacité prédictive.

Sur les modèles traitant des micropolluants (métaux, pesticides) dans les eaux de surface et les eaux souterraines, il faut être à notre avis sans beaucoup d'illusions sur leurs capacités prédictives par exemple en termes de concentrations chiffrées dans les eaux souterraines à un horizon lointain, ou en termes de simulations quantitatives de l'effet de zones tampons en eau de surface sur les concentrations dans les eaux superficielles. Par contre, ces modèles peuvent être utiles pour fournir des indications sur les ordres de grandeur temporels (par exemple, quelle peut être la durée de la contamination des aquifères par les métabolites de l'atrazine sous différentes hypothèses de comportements).

La modélisation de la réponse écologique des milieux aux pressions, aux échelles de temps et d'espace requises par la DCE, est encore une question du domaine de la recherche. Les modèles fonctionnant à ces échelles n'en sont qu'aux premières expériences, et le lien entre ces modèles et les modèles hydrologiques et biogéochimiques (donc le lien avec les pressions anthropiques) n'est encore que partiellement réalisable pour des raisons de manque de connaissances scientifiques assez incontournables.

Au cours de cette étude sont également apparus quelques enseignements grâce à la comparaison des différents modèles mis en œuvre en France.

Les deux principaux programmes de développement de modèles qui sont utilisés en France pour la DCE, celui du Piren-Seine sur le bassin Seine-Normandie, et celui de l'Université de Liège (fournisseur du modèle Pegase, et peut être de futurs systèmes de modélisation plus sophistiqués sur les autres bassins), sont assez comparables en termes de modèles. Il y a même dans les modèles utilisés une complémentarité possible qui mériterait que des liens soient créés entre ces deux équipes :

- les aspects informatiques (bases de données, système d'information géographique, architecture informatique) semblent un point fort de Centre de Modélisation de l'Environnement, alors que le Piren-Seine a développé ces aspects plus récemment, se concentrant plus sur la compréhension des écosystèmes.
- les calculs hydrauliques du modèle Seneque se font sur la base d'une représentation idéalisée du réseau hydrographique. Cette simplification peut être source d'imprécisions par exemple lorsqu'il s'agit de coupler Seneque à des modèles spatialisés pour les eaux souterraines, ou si on est justement intéressé par la répartition spatiale de l'état simulé du réseau hydrographique. Au sein du programme Piren-Seine lui même, le modèle Prose, qui commence à être appliqué sur des bassins versants complets, peut être un complément à terme. Le Centre de Modélisation de l'Environnement a des chantiers avancés de développement de modèles intégrant une description détaillée de l'hydraulique de surface avec les écoulements souterrains. Sur ce sujet aussi, des échanges techniques Seneque/Prose/Pegase pourraient être fructueux.

6.2 QUELQUES PROPOSITIONS POUR UN USAGE RAISONNE DES MODELES.

En vue de leur utilisation opérationnelle pour aider à construire des programmes de mesures de la DCE, il pourrait être utile de « consolider » certains aspects de la mise en œuvre des modèles avant de les utiliser plus intensivement :

- la transformation des données de rejets domestiques et industriels provenant des fichiers des Agences de l'Eau en données assimilables par les modèles ne suit apparemment pas la même procédure selon les modèles (cf Annexe 1). Si ces différences ont des impacts sensibles sur les résultats des modèles, il conviendrait de chercher à les unifier pour pouvoir comparer les résultats de simulation plus facilement d'une Agence à l'autre.
- le calage et la validation sont des opérations-clé pour la construction d'un modèle opérationnel et pour sa crédibilité ultérieure. Bien que les modèles Seneque et Pegase n'exigent qu'un calage très partiel, il faudrait en garder la trace dans un dossier de calage, et connaître la sensibilité des principaux paramètres ayant servi à caler le modèle. De la même façon, il semble utile de constituer un dossier de validation, dans lequel est conservée la trace de simulations confrontées avec des données dont aucune n'a été utilisée pour la calage du modèle, sur un nombre suffisant de situations représentatives, d'un point de vue hydrologique et de qualité d'eau, des situations futures que l'on souhaitera ensuite simuler avec le modèle. Cela permettra également de savoir, lors de la simulation de programmes de mesures, si on utilise les modèles dans des plages sur lesquelles ils ont été validées ou non (ce qui peut influencer sur le poids qu'on donnera à leurs résultats par rapport à des jugements d'expert par exemple).
- L'intégration de plusieurs modèles est souhaitable, puisque la Directive-Cadre promeut la gestion intégrée des ressources. Cependant, l'accumulation de modèles peut accroître l'incertitude et rendre moins robustes les simulations. Pour cette raison, la validation d'une chaîne de modèles (surface+souterrain, ou bassin versant + estuaire) doit être également dans la mesure du possible réalisée, même si chaque modèle a été individuellement validé auparavant. Il faut être également attentif au fait que des paramètres qui étaient peu sensibles dans un modèle peuvent le devenir lorsque ce modèle est intégré dans une chaîne de modélisation.

Par rapport à ce qui était utilisé dans le passé, la quantité de modèles disponibles, et la complexité de chacun augmente, ce qui peut conduire les gestionnaires à déterminer des priorités en matière de modélisation. Quelques critères peuvent être proposés pour aider pour faire ces choix, dans la perspective des outils qui pourraient être utilisés pour construire les premiers programmes de mesures pour la DCE:

- L'état de l'art en matière de modélisation est nettement moins avancé dans le domaine de la biologie que dans celui des modèles incluant physico-chimie et phytoplancton, et il y a des difficultés à faire communiquer ces modèles. Parallèlement, la Directive-cadre s'attache en premier lieu au bon état écologique des ressources Il faudrait pourtant à notre sens éviter de trop privilégier les modèles biogéochimiques, et introduire, même s'ils sont peu prédictifs, des modèles écologiques. Même incomplets et un peu simplistes, les modèles biologiques peuvent être un bon moyen de se forcer à prendre en compte la connaissance

disponible, ou de tenir compte des incertitudes, si on garde à l'esprit leur état de maturité, et si on les accompagne de jugements d'experts. Il faudra également suivre les résultats du projet européen Rebecca, qui vise justement à établir des liens entre modélisation de l'état chimique et modélisation de l'état biologique pouvant être utilisés de façon opérationnelle pour la DCE (cf Annexe 3).

- Etant donné l'état de l'art et le temps qui reste avant de devoir produire les programmes de mesures, il ne paraît pas possible d'utiliser des modèles prédictifs de concentrations dans les masses d'eau en matière de micropolluants (métaux, pesticides, substances prioritaires). Par contre, des modèles permettant d'estimer les flux à l'échelle de bassin versants (sources, flux vers les eaux superficielles et souterraines) seraient utiles, notamment parce que les objectifs principaux (et les plus contraignants pour les substances dangereuses prioritaires) de la Directive-Cadre pour les substances prioritaires sont exprimés en termes de réduction ou de suppression des flux.

D'une façon générale, il est souhaitable de ne pas utiliser simultanément des outils de niveaux de complexité trop disparates.

- La prise en compte de l'impact des situations hydrologiques sur la qualité de l'eau est actuellement déséquilibrée entre les situations d'étiage et les situations de crue ou de pollution par les rejets d'eaux de ruissellement urbain et rural. Les modèles ont plus de facilité à simuler les situations d'étiage, et celles-ci sont donc plus souvent simulées que les périodes de crue et de pluie. Pourtant, les investissements en matière de protection contre la pollution par temps de pluie deviennent très lourds, et l'exposition des écosystèmes à des dégradations de leur environnement provient pour une part significative des événements pluvieux. Un effort de ré-équilibrage dans ce domaine pourrait être fait.

6.3 VERS DES MODELES INTEGRES « HYDRO-BIOGEO-ECO-SOCIO-ECONOMIQUES » ?

Les modèles de simulation envisagés dans ce rapport constituent la première brique de modèles intégrés de construction, d'évaluation du coût et de l'efficacité et finalement du choix de stratégies de réduction des émissions dans les bassins versants pour parvenir aux objectifs de bon état des masses d'eau.

Le programme Piren-Seine commence effectivement à s'engager sur la voie de la construction de tels outils. Une étude socio-économique des résultats des simulations de la pollution des eaux souterraines par l'azote va être réalisée (Monget J.M. et Viavattene Ch, 2004).

Dans ce champ des études économiques, une réflexion méthodologique préalable est nécessaire, pour que les choix économiques qui se feront sur les différents bassins aient lieu sur des bases communes et compatibles avec les exigences des guides méthodologiques issus des groupes de travail de la Directive-Cadre. Par exemple, souhaite-t-on travailler dans un cadre coût/efficacité comme impliqué par la DCE ou aborder d'emblée la notion d'études coût/bénéfices comme cela est fait dans l'étude du Piren-Seine ? Qu'est ce que l'efficacité d'une mesure de réduction de la pollution aquatique ?

La modélisation intégrée, qui recouvre modélisation physique et économique, dont l'usage en France en matière de gestion des ressources en eau est encore peu développé⁶, se profile donc à l'horizon.

La Commission Européenne, pour soutenir la mise en œuvre de la Directive-Cadre sur l'Eau, finance un certain nombre de projets dans le cadre de son 5^{ème} programme de recherche, dont la plupart sont en cours, et qu'elle a ensuite regroupés dans le « cluster » « Catchmod ». L'Annexe 3 donne un bref résumé des objectifs, du planning, et les noms des participants français de chacun de ces programmes. Ce qu'il faut retenir est l'importance très prépondérante accordée dans l'ensemble à la modélisation intégrée, qui est donc vue par la Commission Européenne comme un outil majeur pour parvenir à mettre en œuvre la Directive-Cadre, particulièrement pour ce qui concerne la définition de stratégies de gestion et l'évaluation de leur coût et de leur efficacité. Un autre point très fréquemment traité est celui de la robustesse des modèles et des incertitudes, dont nous avons vu qu'il est encore insuffisamment pris en compte.

Le fait que la recherche européenne soit concentrée sur les modèles intégrés confirme que devra être réalisé dans les prochaines années un transfert du monde de la recherche vers les gestionnaires sur ce type d'outils d'aide à la gestion, ou tout au moins une évaluation préalable de l'intérêt de ce type d'outils pour les gestionnaires. Le principal projet à suivre serait l'action de concertation Harmoni-CA (cf Annexe 3), que la Commission considère comme le projet le plus important, car il va définir des recommandations pour le développement et l'emploi des outils d'aide à la décision utilisés en support de la Directive-Cadre, et cela d'autant plus qu'il n'y a pas de participants français dans ce projet.

⁶ Un des principaux projets actifs en la matière est le projet AGIRE du BRGM, voir <http://aida.brgm.fr>, qui comprend la participation du BRGM au projet européen AQUADAPT (cf Annexe 3)

ANNEXE 1 : CONVERSION DES DONNEES DE REJETS DANS SENEQUE ET DANS PEGASE

Cette comparaison est basée sur deux rapports de mise en œuvre des modèles communiqués par les Agences Seine-Normandie (Bacq, 2002) et Loire-Bretagne (Everbecq et al., 2002).

Comparaison des modalités de prise en compte du carbone organique :

Seneque / AESN	Pegase/ AELB
<p>Les fichiers de données AESN fournissent la matière oxydable (MO) (soit $DCO + 2 \times DBO5$) / 3)</p> <p>La DCO n'étant pas connue, on suppose que $MO = DBO5$</p> <p>On suppose également que : 1 g C organique total = 3 g DBO5</p> <p>Donc <u>C organique total = 1/3 DBO5</u></p>	<p>Pour les rejets domestiques,</p> <p><u>C organique total = 0.385 x DCO</u></p> <p>C organique biodégradable = 0.5 x DBO5</p>
<p>Les modalités de répartition de ce carbone organique total entre les différentes classes de carbone prises en compte dans le modèle (particulaire/soluble) (rapidement/lentement biodégradable) ne sont pas indiquées dans le rapport :</p>	<p>Au sein du carbone organique biodégradable,</p> <p>C lentement biodégradable = 22 %</p> <p>C rapidement biodégradable = 78%</p>

On constate donc une approche différente pour estimer le carbone organique total : basé sur la DCO dans un cas, et sur la DBO dans l'autre. Ces deux options sont incompatibles, puisque

C organique biodégradable (Pegase) > C organique total (Seneque Oise).

Une étude de sensibilité à ce type d'hypothèses permettrait de vérifier la cohérence des résultats entre bassins.

Comparaison des modalités de prise en compte des rejets d'azote :

Seneque / AESN	Pegase/ AELB
<p>Pour les rejets de nitrates, on suppose $\text{NO}_3=0$ dans les rejets après traitement.</p> <p>Pour calculer les rejets en azote ammoniacal :</p> <p>Les fichiers de données AESN fournissent l'azote Kjeldahl NK soit (N organique + NH_4)</p> <p>On suppose en outre que $\text{C organique} / \text{N organique} = 7$</p> <p>Donc $\text{NH}_4 = \text{NK} - \text{C organique} / 7$</p>	<p>Pour les rejets domestiques et pour les nitrates, on considère que $\text{NO}_3=0$ dans les rejets bruts (avant traitement)</p> <p>Pour les rejets domestiques en azote ammoniacal : on suppose N organique = 42 % N Kjeldhal,</p> <p>Puis $\text{NH}_4 = 58 \% \text{ N Kjeldhal}$.</p>

Comparaison des modalités de prise en compte des rejets en phosphore :

Seneque / AESN	Pegase/ AELB
<p>Pour les rejets domestiques, les fichiers de l'Agence fournissent la somme $\text{Pt} = \text{PO}_4 + \text{P organique}$.</p> <p>On suppose en outre que $\text{C organique} / \text{P organique} = 40$</p> <p>Donc $\text{PO}_4 = \text{Pt} - \text{C organique} / 40$</p>	<p>Pour les rejets domestiques bruts on suppose</p> <p>$\text{PO}_4 = 70\% \text{ Pt}$</p> <p>$\text{P organique} = 30\% \text{ Pt}$</p>

ANNEXE 2 : CARACTERISATION DES MILIEUX PHYSIQUE AVEC LE MODELE QUALPHY

L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse a développé avec les DIREN du bassin Rhin-Meuse au début des années 90 l'outil QUALPHY. Il s'agit d'un outil d'évaluation de la qualité du milieu physique. Avec cet outil, un cours d'eau est découpé en tronçons homogènes (de tailles très variables, de quelques centaines de mètres à plus de dix kilomètres pour des cours d'eau de la partie aval du bassin Rhin-Meuse). La méthode de découpage a été développée par une étude inter-agence datant de 1991, et différencie les berges, le lit mineur et le lit majeur. Chaque tronçon reçoit une note globale résultant de la pondération de notes partielles, chacune de ces notes partielles étant donnée pour un critère donné (état des berges, ...) en comparant l'état du cours d'eau à l'état de référence pour ce type de cours d'eau. Au total, affecter une note à un tronçon nécessite de renseigner 40 paramètres, et de calculer puis pondérer 40 notes partielles. Le système de pondération dépend du type de rivière auquel on est confronté (7 types ont été définis pour le bassin Rhin-Meuse).

Développé de 1992 à 1994, QUALPHY a commencé à être utilisé opérationnellement en 1996. Depuis cette date, 4000 km de cours d'eau ont ainsi été caractérisés, avec un objectif de travailler sur un total de 7000 km. Compte-tenu du rythme auquel peut se faire un tel travail, et du fait que la notation doit être révisée environ tous les 7 ou 8 ans, il s'agit d'un travail se déroulant en continu par rotation sur le bassin.

Cet outil ayant été conçu avant l'existence de la Directive-cadre sur l'Eau, il n'y a pas de correspondance entre la notion de tronçon de QUALPHY et la notion de masse d'eau de la DCE. Cependant QUALPHY sera utilisé pour remplir les obligations de la DCE : à partir de 2004, le modèle commencera à être utilisé pour évaluer l'impact sur la qualité hydromorphologique d'opérations de restauration ou d'aménagements de cours d'eau. A travers son système de notations, il sera donc capable de fournir des estimations de l'efficacité de mesures, dans le champ de la qualité physique. Par contre, la question de faire le lien entre qualité physique et bon état écologique des cours d'eau ne sera pas résolue par ce modèle, et relève de questions plus fondamentales.

ANNEXE 3 : LE CLUSTER DE PROJETS EUROPEENS DE RECHERCHE « CATCHMOD »

La Commission Européenne, pour soutenir la mise en œuvre de la Directive-Cadre sur l'Eau, finance un certain nombre de projets dans le cadre de son 5^{ème} programme de recherche, dont la plupart sont en cours, et qu'elle a ensuite regroupés dans le « cluster » « Catchmod ». Cette Annexe 3 donne un bref résumé des objectifs, du planning, et les noms des participants français de chacun de ces programmes.

Un premier groupe « HarmoniXX » est composé de projets visant à établir des méthodologies communes pour développer, vérifier la qualité, évaluer l'incertitude et utiliser des modèles intégrés. Plusieurs autres projets concernent également le développement et l'utilisation des outils de modélisation intégrés (hydrologie/écologie/économie).

On remarquera la forte implication du Cemagref dans ces projets. Le Cemagref est également impliqué dans un projet n'appartenant pas à Catchmod mais important à l'égard de le DCE, le projet REBECCA, qui vise à identifier l'état des connaissances sur les liens entre qualité chimique et qualité des eaux, à améliorer la connaissance et à l'intégrer dans des outils opérationnels.

Un autre projet, qui ne fait pas partie de Catchmod, regroupe plusieurs partenaires dont 3 français (Université de Versailles, Université de Paris 1, BRGM). Il s'agit d'AQUADAPT (www.aquadapt.net), qui a pour but de rapprocher la planification des ressources en eau de la planification du développement socio-économique, notamment en développant un outil informatique de planification.

Nom du projet	Brève description des objectifs	Planning	Participant français	Site Internet
HarmoniCA	Harmonisation et recommandations pour le développement de modèles intégrés, notamment sur le thème de l'utilisation conjointe de mesures et de modèles, et le rôle des modèles intégrés comme interface entre la science et la gestion. HarmoniCA ne fait pas de recherche mais synthétise les connaissances disponibles et produit des recommandations.	2003-2007	Aucun	www.harmoni-ca.info
HarmoniT	Développer un cadre informatique pour relier des modèles hydrologiques		Cemagref	
HarmoniQUA	Harmonisation des procédures d'Assurance de la Qualité pour le développement et l'utilisation de modèles de gestion de bassins versants.	2002-2005	Cemagref	www.harmoniqua.org
HarmoniRIB	Définir une méthodologie et des outils pour évaluer et décrire les incertitudes provenant des données et des modèles utilisés pour l'aide à la décision dans un cadre intégré (hydrologie/écologie/économie), sur un bassin versant.		Aucun	www.harmonirib.com
BMW (Benchmark Models for the WFD)	Etablir une série de tests sur les aspects socio-économiques, biogéochimiques de modèles intégrés pour évaluer leur adaptation à une utilisation dans le cadre de la DCE. Tests et démonstration de modèles ainsi sélectionnés.	2002-2005	Cemagref	www.environment.fi puis taper « BMW » dans la zone de recherche.

Nom du projet	Brève description des objectifs	Planning	Participant français	Site Internet
Euroharp	Evaluation des outils existants, développement de méthodes et d'outils harmonisés pour quantifier les émissions diffuses de nutriments (N, P) vers les eaux de surface continentales et côtières.	2002-2005	IFEN (Ph. Crouzet)	www.euroharp.org
Mulino	Développement et tests d'un système d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau, basé sur des modèles hydrologiques, des indicateurs et des procédures de choix multi-critères.	2001- ?	Aucun	http://feem.it/web/loc/mulino
Transcat	Développement d'un système d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau dans le cas de bassins versants transfrontaliers.		Aucun	
Firma	Développement et applications-test d'un outil de planification de la gestion des ressources en eau en utilisant les techniques de modélisation multi-agents (représentation explicite des acteurs et de leurs comportements)	1999-2003 (terminé)	Cemagref	http://firma.cfpmp.org
GouvernE	Développer un système d'aide à la gestion des aquifères	1999-2003 ?	Coordination par le C3ED	Site du C3ED : www.c3ed.uvsq.fr
TempQSim	Développer des outils de modélisation de la qualité de l'eau adaptés aux bassins semi-arides Méditerranéens.	1999-2003 ?	Maison des Sciences de l'Eau (Université de Montpellier/CNRS /IRD)	www.tempqsim.net

Nom du projet	Brève description des objectifs	Planning	Participant français	Site Internet
Eurolakes	Amélioration des connaissances sur le fonctionnement des lacs profonds, et modélisation de ces lacs (Lac du Bourget et Lac Léman notamment).	1999-2002 (terminé)	Sogreah Université de Savoie	http://pcs0.hydromod.de/Eurolakes/
Clime	Développement de modèles pouvant simuler l'influence du climat sur l'état de lacs.	2003-2006	Aucun	
Daufin	Développement de modèles de qualité de l'eau avec des techniques d'assimilation de données.			

ANNEXE 4 : REFERENCES DES DOCUMENTS CITES ET AUTRES DOCUMENTS CONSULTES

Aquascop, Mise en œuvre de la DCE, Identification des pressions et des impacts, guide méthodologique version 4.1, Mars 2003, rapport pour le MEDD – Direction de l’Eau.

Bacq N., Apports de la modélisation dans les scénarios de la directive cadre sur l’eau – Etude Pilote sur le bassin versant de l’Oise, rapport de stage de DESS pour l’AESN, 2002.

Bacq N. et Billen G., Le scénario tendanciel de la DCE - Modélisation de la qualité de l’eau des grands sous-bassins amont Eure / Oise / Marne / Seine-amont – Modèle Seneque 3.1, rapport PIREN-Seine, 2003.

Beture-Cerec, Estimation des surplus N et P d’origine agricole : Présentation de la méthodologie de calculs et Condition de mise en oeuvre pour le bassin Rhin-Meuse, présentation powerpoint.

Billen G. et al., Modelling phytoplankton development in whole drainage networks : the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system, *Hydrobiologia* 289 :119-137, 1994.

Billen G. and Garnier J., Nitrogen transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the ‘Riverstrahler’ model, *Hydrobiologia* 410 : 139-150, 2000.

Blanchoud H. et al., Développement d’un module de transfert des pesticides vers les eaux de surface dans un petit bassin versant élémentaire de l’Orgeval, rapport PIREN-Seine 2004.

Blanchoud H. et al., Modélisation du transfert des pesticides dans le bassin versant de la Marne, rapport PIREN-Seine 2003.

Cemagref-Lyon, Estimhab version test, note disponible sur le site du Cemagref de Lyon, qui contient une liste complète de références publiées sur le modèle.

Crouzet Ph., Reporting river quality using the Water Quality Accounts methodology, Application within the Eurowaternet process, Rapport draft pour l’Agence Européenne de l’Environnement, 2001.

Cugier P. et al., Modélisation du transfert de nutriments de la Seine vers la Baie de Seine et de l’eutrophisation côtière, rapport PIREN-Seine, 2003.

Cugier P. et al. Réponse de l’eutrophisation de la Baie de Seine au scénario tendanciel 2015, rapport PIREN-Seine, 2004.

Dessevre et al., Application du modèle Modcou au renseignement des masses d’eaux souterraines de la DCE, rapport PIREN-Seine, 2004.

ECRIN – Club environnement et société, Modélisation des transferts de pesticides dans l’environnement, Les cahiers des Clubs CRIN, MEDD, 2002.

Even S. et al., Développements opérationnels des outils de modélisation de la qualité de l’eau dans le bassin de la Seine : Prose à tubes de courant, version 3, rapport PIREN-Seine, 2003.

- Everbecq E. et al., Application pilote de Pegase au bassin du Cher, Rapport final, Annexe I : modélisation de l'écosystème, rapport pour l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2002.
- Everbecq E. et al., Consolidation et intégration de Pegase au système de l'Agence, Rapport final, Rapport pour l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2001.
- Flipo N. et al., Le Grand-Morin : contribution du benthos et du plancton aux bilans biogéochimiques, rapport PIREN-Seine, 2003.
- Frezouls M. et Dauta A., Etude préalable au développement d'un modèle de qualité des eaux sur le bassin Loire-Bretagne, rapport intermédiaire, rapport final, additif au rapport final, CNRS, 1999.
- Garnier J. et al., Modelling the transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube river, *Estuarine, Coastal and Shelf science* 54 : 285-308, 2002.
- Ginot V., EVHA, guide de l'utilisateur, Décembre 1998.
- Gomez E. et al., Principe et fonctionnement du modèle intégré STICS-MODCOU-NEWSAM, rapport PIREN-Seine, 2003.
- Groupe National Connaissance, Cahier des Charges pour l'évolution des réseaux de suivi de la qualité des eaux de surface continentales en France, 2001.
- Laurans Y. et al., Contribution à l'évaluation économique de la Directive-cadre : illustration avec un scénario tendanciel sur le bassin versant de l'Oise , Techniques Sciences Méthodes, numéro 1, 98^{ème} année, pp 52 – 59, 2003.
- Mazuer P. et Matte J.L., Qualité physique de la Fensch, rapport DIREN Lorraine n°4479, Mars 2001.
- MEDD Direction de l'Eau, Procédure d'élaboration de l'état des lieux : caractérisation du district hydrographique et registre des zones protégées, Organisation des travaux 2002-2004, 2003.
- Monget J.M. et Viavattene CH., Exploitation socio-économique des résultats de simulation des pollutions azotées souterraines en mode prédictif, rapport PIREN-Seine, 2004.
- PIREN-Seine, Modélisation du compartiment piscicole, Rapport de synthèse, Février 2002.
- Poulin M. et al., Evolution prospective de la qualité des eaux de surface ; Scénario de la DCE de l'agglomération parisienne à l'estuaire, rapport PIREN-Seine, 2004.
- Rat A. et al., Etude du transfert de pesticides sur le bassin de la Vesle : intrants agricoles et modélisation du transfert vers les eaux de surface et souterraines. Rapport PIREN-Seine, 2004.
- Rémillon O., Étude des substances prioritaires à prendre en compte pour l'échéance 2015 de la Directive Cadre sur l'Eau sur le bassin Rhin Meuse - Modélisation des apports diffus en métaux lourds sur le bassin Rhin-Meuse – Évaluation de l'évolution des apports sur la période 2000 à 2015, Rapport de stage INAPG, 2003.
- Ruelland D. et Billen G., Seneque 3, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité des eaux de surface, rapport PIREN-Seine, 2003.
- Ruelland D. et Billen G., Couplage de la chaîne Stics/Modcou avec Seneque 3, rapport PIREN-Seine, 2003.
- Ruelland D. et Billen G., Applicatif Seneque 3 : notice d'utilisation (2001-2003), rapport

PIREN-Seine, 2003.

Sachon G. et al., Diagnostic et restauration des milieux aquatiques pour 2015. Quelques questions soulevées par la directive-cadre européennes sur l'eau, Techniques Sciences Méthodes, numéro 1, 98^{ème} année, pp 39 – 44, 2003.

Smitz J. et al., Pegase, une méthodologie et un outil de simulation prévisionnelle pour la gestion de la qualité des eaux de surface, Tribune le l'Eau, n° 588/4, Juillet/août 1997.

Souchon Y. et al., Vers de nouveaux outils pour l'aide à la gestion des hydrosystèmes : couplage des recherches physiques et biologiques sur les cours d'eau, *Natures Sciences Sociétés*, vol.10 suppl. 1, 26s-41s, 2002.

Terres J.M. et al., Calculation of agricultural nitrogen quantity for EU river basins, rapport EUR 20256 pour le Joint Research Center.

Théry S. et Bacq N., Bases de données et SIG : développement des bases de données et des applications de prétraitements, rapport PIREN-Seine, 2003.

Thibert S., Grosbois C., Bacq N., Géguen Y., et al., Sequamet 1.0, Système expert sur la contamination métallique du bassin de la Seine, rapport PIREN-Seine, 2004.

Wagner J.P., Outil de linéarisation de la qualité des cours d'eau : Étude test sur le bassin Rhin-Meuse, Diren de Bassin Rhin-Meuse, présentation powerpoint août 2003.

Wasson J.G. et al., What kind of water models are needed for the implementation of the European Water Framework Directive ? Examples from France., *Int. J. River Basin Management*, Vol.1, No2, pp 125-135, 2003.

Wasson J.G. et al., Définition des hydroécorigions françaises – Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive cadre pour la gestion es des eaux, rapport Cemagref pour le MEDD, 2001.

Wasson J.G. et al., Les hydroécorigions de France Métropolitaine, approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements référence d'invertébrés, rapport Cemagref pour le MEDD, 2002.