

Evolution du modèle hydrogéologique MODCOU et stratégie de couplage avec un modèle économique et un modèle de pesticide »

Florence Habets¹, Emmanuel Ledoux², Pascal Viennot², Elodie Philippe², Cédric David², Elodie Moreau Guigon³, Hélène Blanchoud³, Pierre Alain Jayet⁴, Alessia Bacchi³, Pavel Zakharov⁴

¹ UMR SISYPHE, CNRS-UPMC, Paris, France email : florence.habets@ensmp.fr

² UMR SISYPHE, Centre de géosciences ENSMP, Fontainebleau, France

³ UMR SISYPHE, EPHE, Paris, France

⁴ INRA, Grignon, France

1. Introduction	1
2. Restructuration du code MODCOU-NEWSAM	2
2.1. Nouvelle norme de codage définie pour la modélisation hydrogéologique	2
2.2. Gestion des résolutions spatiales	3
2.3. Etat d'avancement de la restructuration de MODCOU-NEWSAM	4
3. Amélioration des transferts dans la zone non saturée	4
4. Développement d'un nouveau modèle simplifié de routage en rivière	5
5. Couplage avec le modèle phytosanitaire STICS-phytodel	7
6. Couplage avec le modèle agro-économique AROPAj-STICS	7
6.1. Présentation générale de l'étude agro-hydro-économique	7
6.2. Principe de fonctionnement du modèle agro-économique	8
6.3. Principe et limitation du couplage du modèle agro-économique avec le modèle hydrogéologique	8

1. Introduction

Après une période de réflexion sur les limitations de la modélisation grand bassin des transferts de contaminant existants de type STICS-MODCOU-NEWSAM et STICS-Phyto-MODCOU-NEWSAM, et sur les besoins grandissants de couplage et d'interactions fortes avec des modèles de processus et des modèles économiques, nous avons définis une stratégie d'évolution des couplages. Cette stratégie se base avant tout sur des couplages de modèles experts pouvant interagir facilement via des interfaces de communication, sans pour autant être intégrés dans le code de calcul, afin de laisser la possibilité aux codes experts d'évoluer librement.

Un important effort est fait actuellement par l'INRA pour faire évoluer le code du modèle agronomique STICS vers une structure à la fois spatialisée et modulaire.

De même, le développement du modèle STICS-phytodel, en cours de réalisation, prend en compte la nécessité d'une structure modulaire.

Un point bloquant reste donc avec la modélisation hydrogéologique MODCOU-NEWSAM, qui a une structure assez lourde et limitant les interactions, et c'est donc d'abord sur ces modèles que se porte toute notre attention.

De ce fait, nous avons commencé en 2007 à restructurer la modélisation MODCOU NEWSAM.

Une nouvelle structure informatique a été définie.

Bien qu'incomplète, la nouvelle version de MODCOU-NEWSAM est utilisée dans une étude visant à améliorer la simulation des transferts d'eau et de polluant passif dans la zone non saturée (section 3). En parallèle, un nouveau modèle de routage en rivière simplifié, basé sur la méthode de Muskingum a commencé à être développé par Cédric David, actuellement en CDD à l'ENSMP, et devrait permettre

notamment une amélioration du calcul des relations nappe – rivière, grâce à l’abandon des zones isochrones (section 4).

Enfin, durant l’année, nous avons pu préciser les besoins pour un couplage avec le modèle de pesticide STICS-phytodel (section 5), ainsi qu’avec le modèle agro-économique AROPAj –STICS (section 6)

2. Restructuration du code MODCOU-NEWSAM

La restructuration a pour objectif à la fois de simplifier des applications parfois lourdes (nécessité de faire tourner à la fois MODCOU et NEWSAM), tout en augmentant les capacités du modèle à prendre en compte les interactions. Elle a aussi pour objectif de faire évoluer le code en permettant l’introduction de modèles plus physique, tout en conservant la capacité de refaire tourner les simulations actuelles. Il y a donc la nécessité de reprendre tous les éléments actuellement disponibles dans le code.

Nous avons donc dans un premier temps défini les différentes entités relativement homogènes qui doivent pouvoir être modélisées avec des niveaux de complexité variables selon les applications, et qui doivent pouvoir dialoguer avec les autres éléments afin de bénéficier d’un maximum d’interaction.

A la vue des éléments existant actuellement dans Modcou et Newsam, nous allons commencer par recoder 5 entités

- Le calcul du bilan hydrique en surface
- Le transfert d’eau et de polluant passif dans la ZNS
- Le transfert d’eau en nappe
- Le transfert de polluant passif en nappe
- Le transfert d’eau en rivière

2.1. Nouvelle norme de codage définie pour la modélisation hydrogéologique

Un des objectifs de la nouvelle version est de disposer de plusieurs modules pour simuler la même entité. Ces modules seront interchangeable et utilisables via des options de simulation.

Afin de permettre les interactions entre ces entités, il est nécessaire de simuler les processus de façon séquentielle. Mais, pour garder un aspect interchangeable, cela implique de distinguer différentes phases dans chaque module.

Suite à des réunions de travail (http://www.sisyphes.upmc.fr/~agnes/gdt_sim/gdt_frame.html), le choix a été pris de demander à chaque module de distinguer :

1. Une phase d’initialisation, qui permet de décrire le milieu à simuler
2. Une phase d’acquisition des données variables dans le temps (ex : forçage météo, flux d’infiltration, caractéristique de la végétation, autres...)
3. Une phase de simulation
4. Une phase d’écriture des sorties
5. Une phase d’écriture de fichiers contenant les variables d’état en fin de simulation, ces fichiers pouvant être utilisés pour relancer le modèle.

Chaque module doit donc posséder son propre fichier d’instruction, décrivant par exemple l’emplacement des fichiers d’entrée, le type de sortie, et les pas de temps de simulation et des sorties.

L’aspect interchangeable des modules pose également le problème de la gestion des variables. La majorité des variables sont internes aux modules, mais, certaines sont l’objet d’interaction entre plusieurs entités (par exemple entre la surface et la zone non saturée), et doivent donc être connues par plusieurs modules. On gère donc 2 types de variables : les variables *globales*, et les variables *intra-modules*. Le nom et l’unité des variables globales sont imposés aux modules (c’est le cas par exemple du flux de percolation qui peut interagir avec les entités ‘bilan hydrique’, ‘transfert dans la ZNS’ et ‘transfert dans la nappe’).

Par contre, le nom et l’unité des variables *intra-modules* sont propres à chaque module mais doivent être clairement explicités.

Dans tous les cas, les variables sont allouées dynamiquement, avec des tailles spécifiées dans les fichiers d'instructions des modules. Ce simple fait qui peut paraître basique de nos jours va cependant lever quelques limitations du modèle actuel, qui contient certaines dimensions de tableaux « en dur », limitant ainsi notamment le nombre de stations hydrologiques ou piézométriques simulées.

2.2. Gestion des résolutions spatiales

Un des problèmes de la modélisation hydrogéologique est que les résolutions utilisées pour décrire les différentes unités ne sont pas les mêmes. Dans le code original de MODCOU et NEWSAM, des règles simples, mais strictes, de découpages spatiaux, permettaient une gestion assez simple des transferts de données entre les entités.

Le fait de rendre le code modulaire implique qu'on ne peut pas conserver cette gestion simple des transferts entre entité, puisque les modules « plus physique » que nous voulons introduire pourront gérer l'espace d'une manière très différente de ce qui est fait avec MODCOU et NEWSAM actuellement.

Pour gérer les problèmes de cohérence spatiale, nous avons choisi d'imposer à tout module qui est amené à interagir avec un autre module de spécifier les relations spatiales entre chaque unité spatiale des 2 modules. Cela se fait pour l'instant via des fichiers de correspondance.

Pour illustrer la notion des échanges vers des entités aux discrétisations spatiales différentes, la Figure 1 représente la discrétisation spatiale utilisée pour calculer le bilan en surface, qui est l'intersection entre 16 occupations du sol et plus de 1000 mailles météo. On obtient alors 10070 unités de calcul.

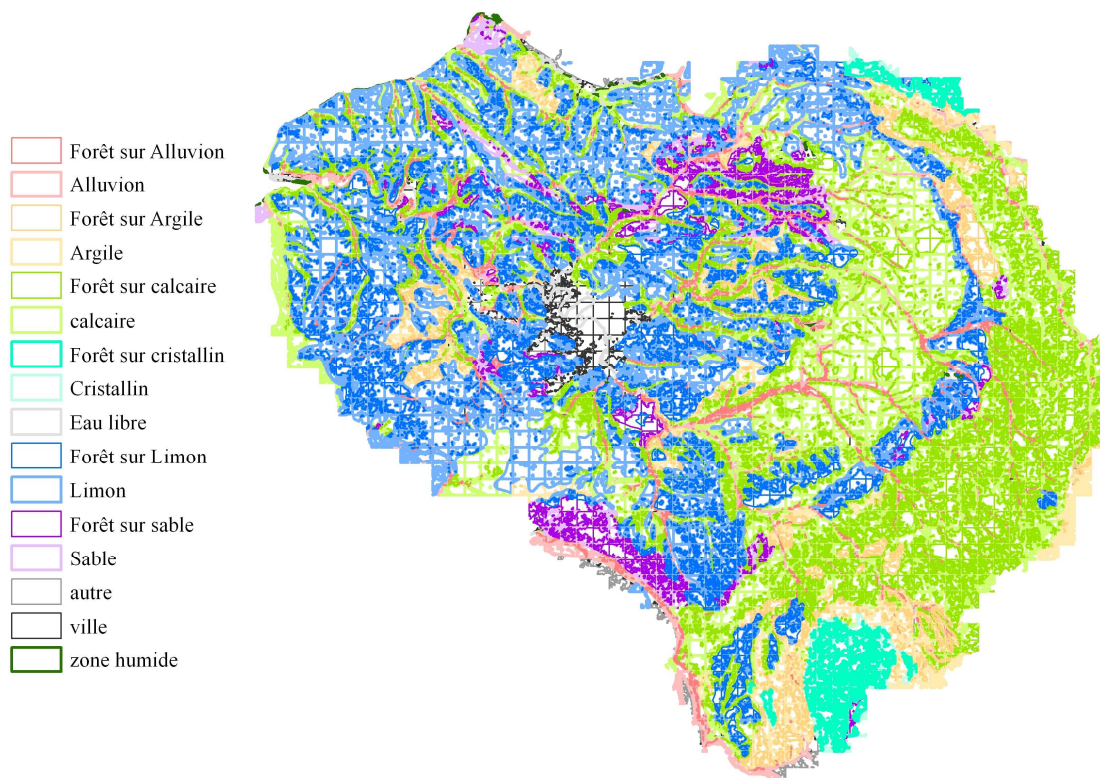


Figure 1 Illustration de la discrétisation spatiale utilisée pour calculer le bilan hydrique (10070 unités)

Par ailleurs, le transfert dans la zone non saturée est discrétisée sur un ensemble de 35698 mailles. Dans la version originale de MODCOU, les résultats du calcul du bilan hydrique sont tout d'abord moyennés sur les unités de calcul du module Nonsat avant de faire le transfert.

Pour des raisons de modularités, mais aussi pour pouvoir gérer par la suite des rétroactions, nous procédons maintenant légèrement différemment. Ainsi, pour relier ces deux entités, on gère un ensemble de 102943 relations (Figure 2) entre la surface et la zone non saturée.

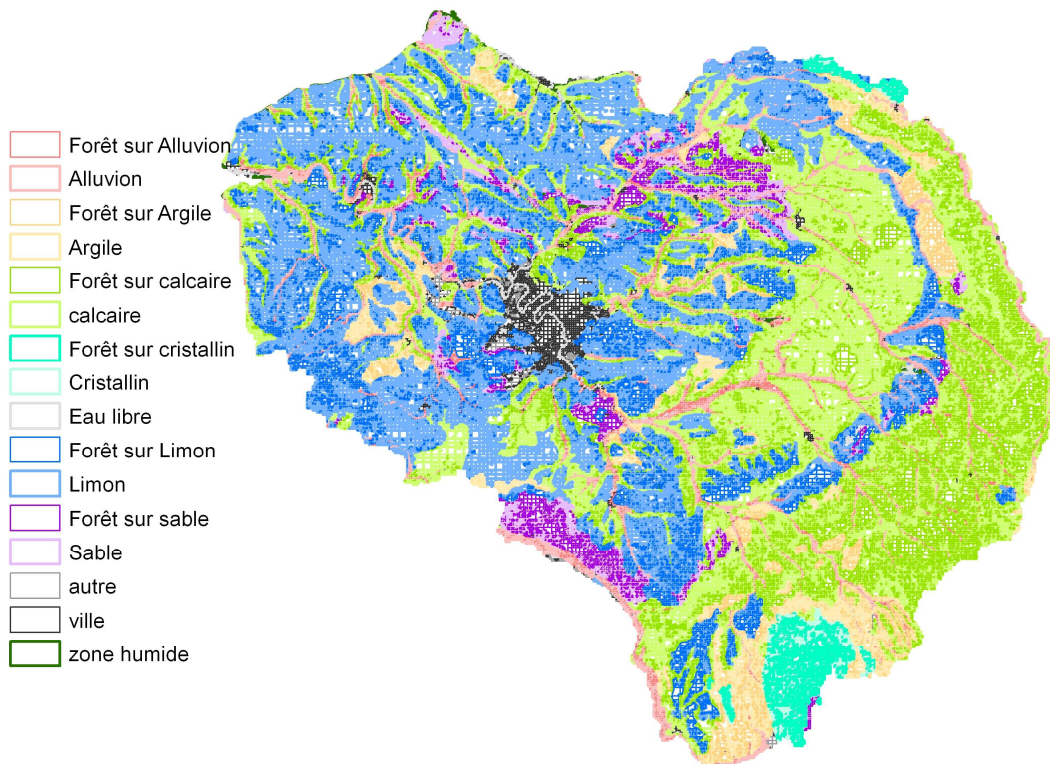


Figure 2 : Illustration de la discrétisation spatiale des échanges entre la surface et la zone non saturée (102943 unités)

2.3. Etat d'avancement de la restructuration de MODCOU-NEWSAM

Actuellement, 4 modules ont été codés : 2 dans l'entité 'bilan hydrique' : Fonction de Production et flux imposés, et 2 dans l'entité 'transfert dans la zone non saturée' : Nonsat et Nonsat Transport. Le module « flux imposés » consiste simplement à prescrire les infiltrations et ruissellement qui seront fournis par la suite aux autres entités du modèle. Cela permet donc de gérer facilement des tests de sensibilités.

De plus, un effort est actuellement porté sur la modélisation des transferts dans la zone non saturée (voir section 3).

Un nouveau modèle de transfert en rivière est en cours de développement (section 4)

Deux entités importants restent à introduire : le transfert d'eau en nappe, et le transfert de polluant passif en nappe. Pour le premier, on se basera sur la version utilisée à Météo-France dans l'application SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU, Habets et al., 2007), qui est déjà codée en fortran 90 et dans une structure proche de celle nécessaire.

Pour le transfert de polluant passif en nappe, on se basera sur le module NEWSSEL de NEWSAM.

On espère pouvoir intégrer ces 2 modules dans le premier semestre 2008.

3. Amélioration des transfert dans la zone non saturée

Un des premiers objectifs de la restructuration de MODCOU-NEWSAM est d'ajouter des interactions sur les processus actuellement modélisés, et en particulier de prendre en compte les battements de nappe sur le lessivage des polluants. Cela nécessite donc de faire évoluer la simulation des transferts

dans la zone non saturée (ZNS) du module Nonsat Transport (Gomez, 2002). La modélisation des transferts dans la ZNS par MODCOU repose sur un modèle très simple : une cascade de réservoirs dite ‘de Nash’, dans lequel l’eau se vidange d’un réservoir à un autre. Cette représentation a été modifiée par Gomez (2002) afin de prendre en compte le transfert de polluant passif. La modification a introduit de nouveaux paramètres, mais reste relativement simple, ce qui offre l’avantage d’être facilement applicable sur des grands bassins. On se propose donc de faire évoluer ce modèle simplifié en prenant en compte le battement de nappe. Cela se traduira par une modification du nombre de réservoir dans la cascade. Si cela ne pose pas trop de problèmes lorsque la nappe monte, il faut cependant régler quelques aspects lorsque la nappe redescend, en spécifiant notamment le contenu en eau et la quantité de polluant contenu dans ces réservoirs qui viennent de se dé-saturer.

Ainsi, pour vérifier d’une part la robustesse de notre modèle simplifié, et pour définir la meilleure méthode à suivre pour initialiser les réservoirs de la cascade lorsque la nappe se retire, nous avons choisi de comparer le modèle simplifié Nonsat Transport à un modèle beaucoup plus physique Métis. Cette étude est menée actuellement par Elodie Philippe, en thèse au centre de Géosciences, et elle est présentée plus en détail par Philippe et al., 2008. Pour cette étude, des tests 1D avec une concentration et une infiltration imposée, ainsi que 2D sur l’ensemble de la Seine ont été réalisés avec la nouvelle version de MODCOU.

4. Développement d’un nouveau modèle simplifié de routage en rivière

La gestion des transferts en rivière dans MODCOU repose sur une base physique très simple (réservoir linéaire), avec une mise en place technique (transfert par zone isochrone) qui s’avère contraignante. En effet, pour simuler les débits à une station, le réseau hydrographique, constitué de mailles rivières, était découpé en bief pour lequel le temps de transfert à la station est un nombre entier de pas de temps de calcul. Ainsi, dans la Figure 3, les biefs 1 et 2 sont respectivement à 1 et 2 jours de transfert jusqu’à la station, les biefs 3 et 4 sont situés à 3 jours de transfert, et les biefs 5 et 6 respectivement à 4 et 5 jours de transfert.

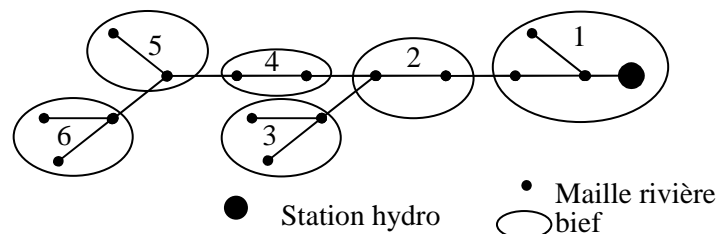


Figure 3 : description des biefs isochrones utilisés dans le modèle de rivière de MODCOU

Ainsi, le volume d’eau transféré concernait jusqu’à présent le volume d’un ensemble de maille rivière, qu’il fallait ensuite répartir au sein de chaque maille rivière pour le calcul des relations nappes rivières. La simplicité du modèle de routage de MODCOU ne permet pas de calculer une hauteur d’eau dans la rivière, qui devrait conditionner les relations nappe-rivière. A la place, on utilise une hauteur d’eau constante en rivière, et les échanges sont essentiellement pondérés par l’évolution du niveau de la nappe. Cependant, dans le cas où la rivière alimente la nappe (Figure 4b), les échanges sont tout de même limités par le volume d’eau contenu en rivière, au sein de chaque maille rivière.

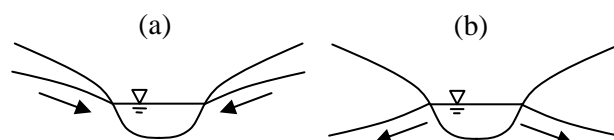


Figure 4 Gestion des relations nappes rivières dans Modcou : (a) : la nappe alimente la rivière ; (b) la rivière alimente la nappe.

Or, si le volume est bien géré au niveau des biefs, il est réparti de façon empirique au sein des mailles rivières contenu dans ce bief, et l'on peut ainsi par cet artefact numérique faire transiter de l'eau d'un affluent à un autre. Cela pourrait être le cas par exemple des biefs 1, 3 et 6 de la Figure 3.

Pour faire sauter ce verrou tout en conservant la discrétisation des mailles rivières existantes, il faut donc se passer du routage isochrone. Cela permettra par ailleurs une simplification notable du code lorsque l'on gère un grand nombre de stations hydrométriques (cas de l'application SIM), via l'abandon de la gestion des biefs pour chaque station.

Afin d'améliorer le routage en rivière, tout en gardant une approche simplifiée, afin d'être applicable aisément partout (il ne s'agit pas de refaire un modèle hydraulique de type St Venant, nécessitant de nombreuses données, et utilisable que dans les grands cours d'eau), Cédric David, en séjour pour 6 mois au centre de Géosciences a développé un modèle basé sur la méthode classique de Muskingum (Cunge 1969). Cette relation permet de calculer le volume d'un tronçon de rivière (V) en fonction des débits entrants (Q^{in}) et des débits sortant (Q^{out}) :

$$V(t) = k \cdot (x \cdot Q^{in}(t) + (1-x) Q^{out}(t))$$

Cette méthode offre plusieurs avantages :

- La méthode linéaire utilisée jusqu'à présent dans MODCOU est une version simplifiée de Muskingum ($x=0$). On pourra donc aisément se replacer dans les conditions d'origines de l'application de Modcou
- Cette méthode ne dépend que de 2 paramètres conceptuels (k et x), qui doivent être renseignés pour chaque maille rivière. Ces paramètres peuvent bien sur être homogènes au sein d'un bassin versant. Cela reste comparable au modèle de routage utilisé dans Modcou, qui avait besoin de définir un paramètre par maille rivière et un paramètre pour l'ensemble du bassin (le temps de concentration).
- Cette méthode est évolutive : on pourra utiliser des relations classiques pour relier les variables volume d'eau et hauteur, et éventuellement, faire varier la vitesse de transfert (actuellement constante), en fonction du volume.

De plus, le code a été développé en intégrant dès l'origine la volonté d'assimiler les débits, soit pour optimiser les paramètres (k et x), soit pour utiliser le modèle en prévision. Le code a donc été développé sous forme matricielle, et une méthode d'optimisation basée sur la librairie mathématique PETSC a été intégrée.

LA SEINE A BAR-SUR-SEINE

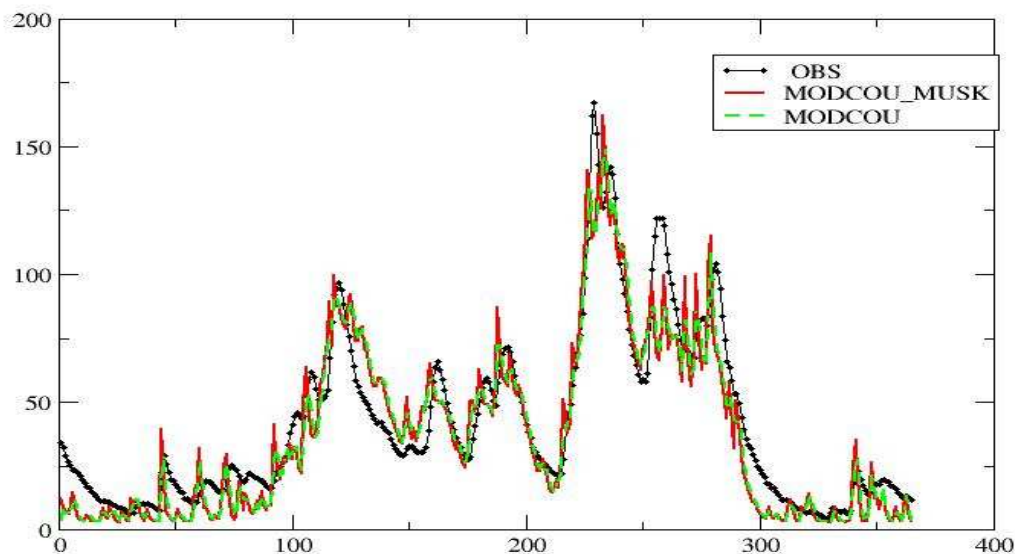


Figure 5 : exemple du résultat du modèle de routage sur la Seine à Bar sur Seine, après une première optimisation du modèle de routage à l'échelle du bassin.

Ce code a tout d'abord été développé de façon autonome, et des tests ont été réalisés en utilisant les flux d'eau simulés par le modèle SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) sur la France. Le modèle de routage a été optimisé, en essayant de minimiser l'erreur entre les débits observés et simulés sur une période hivernale de 30 jours. Dans cette première optimisation, les valeurs k et x sont imposées constant à l'échelle du bassin versant. Les résultats obtenus (exemple à Bar-sur-Seine Figure 5) sont très proches de ceux obtenus par le modèle de routage original de Modcou. On espère cependant améliorer les résultats en optimisant les paramètres à l'échelle des sous-bassins versants.

Par ailleurs, le modèle de routage a été ici utilisé en mode externe à MODCOU. La nouvelle étape à franchir est donc d'utiliser ce modèle en mode couplé. Seul le mode couplé permettra l'amélioration de la gestion des relations nappe-rivière. Cette étape est en cours de réalisation, mais risque de prendre du retard avec le départ prochain de Cédric David.

5. Couplage avec le modèle phytosanitaire STICS-Phytodel

La modélisation de la contamination des hydrosystèmes par les produits phytosanitaires a été menée dans le cadre du PIREN-Seine selon 2 approches, l'une favorisant la spatialisation et le transport détaillé vers la nappe (STICS-Phyto, Rat et al., 2006), l'autre favorisant une intégration plus globale, en se plaçant à l'échelle du bassin versant, mais en prenant en compte les différents processus se produisant depuis l'atmosphère jusqu'à la nappe, et en gérant la multiplicité des produits phytosanitaires utilisés (Phytodel, Guigon-Moreau, 2006). Ces deux approches sont actuellement en cours de fusion (Moreau Guigon et al., 2008) dans le modèle STICS-Phytodel, qui va être couplé à la nouvelle version de MODCOU. Cela constituera la première modélisation véritablement intégrée, et correspond complètement aux objectifs du projet EAU-dyssée.

Moreau Guigon et al. (2008) décrivent le principe de la fusion entre STICS-phyto et Phytodel, ainsi que le couplage avec le modèle hydrogéologique.

Ce couplage nécessite une adaptation de la modélisation des transferts de polluant dans la zone non saturée, car le transfert de pesticide ne peut pas être considéré comme passif. En effet, les pesticides transférés sous forme dissoute dans la zone non saturée peuvent être adsorbés, et ainsi immobilisés dans la zone non saturée. Ils peuvent également être dégradés. Les phénomènes d'adsorption et désorption doivent donc être modélisés dans la zone non saturée. On envisage donc pour l'instant d'adapter le modèle Nonsat-transport (Philippe et al., 2008) au transfert de pesticide en y intégrant ces 2 processus. Ce travail va être réalisé début 2008 par Alessia Bacchi, actuellement en stage de fin d'étude Ingénieur.

Par la suite, il faudra également prendre en compte ces phénomènes d'adsorption-désorption dans la nappe. Cela nécessitera la modification du modèle de transport convectif de soluté actuellement utilisé dans NEWSAM (newsel).

6. Couplage avec le modèle agro-économique AROPAj-STICS

6.1. Présentation générale de l'étude agro-hydro-économique

L'objet du couplage agro-économique-hydrogéologique développé dans le cadre du thème GES/ECO du PIREN-Seine (Cantelaube et al., 2008) a pour objectif d'étudier les conséquences des changements économiques sur le comportement des agriculteurs en terme d'assolement et d'utilisation de produit (dans un premier temps, les engrais, mais, à terme peut être aussi les produits phytosanitaires), et d'en étudier les conséquences sur la pollution diffuse de l'hydrosystème. En effet, le comportement des agriculteurs peut et va varier en fonction des modifications de la politique agricole commune (PAC), mais aussi, en fonction du prix du marché des produits, de l'essor (ou non) des biocarburants, et d'autres facteurs (l'évolution du climat par exemple). On conçoit facilement que si les agriculteurs ont un avantage économique à produire plus, cela aura tendance à s'accompagner d'une augmentation de l'usage d'engrais, et donc, d'un risque accru de pollution diffuse par ce polluant. Pour contrer cela, le législateur pourrait décider la mise en place de contraintes légales (réglementation des doses maximales), ou économiques (taxe sur les intrants). Ces différents scénarios pourront être étudiés par

le modèle agro-économique AROPAj-STICS (Cantelaube et al., 2008), qui permet d'estimer les assolements et pratiques agricoles qui optimisent les bénéfices économiques d'exploitation agricole types, ainsi que les rejets en différents polluants (notamment, ceux associés au cycle de l'azote) vers l'atmosphère et/ou l'hydrosystème.

Le couplage avec le modèle hydrogéologique MODCOU permettra d'étudier les conséquences de ces comportements sur la pollution des nappes en nitrate. Cette pollution peut servir d'indicateur du coût de ces pratiques, par exemple en estimant le coût associé au traitement de l'eau pour la rendre potable. Si les coûts sont importants, le législateur sera certainement amené à adopter une politique contraignante, et plusieurs scénarios seront utilisés dans AROPAj pour estimer la politique (taxe, limite) la plus efficace.

6.2. Principe de fonctionnement du modèle agro-économique

D'un point de vue numérique, le modèle économique AROPAj est indirectement lié au modèle agronomique STICS. Pour chaque culture, le modèle STICS est utilisé pour calculer des « fonctions de réponse » décrivant l'évolution du rendement en fonction des intrants en nitrate. Pour chacune des cultures et chacune des exploitations agricoles type, on sélectionne une fonction de réponse parmi plusieurs réponses dépendant des types de sol, des dates de semis, etc... Le modèle économique AROPAj permet de calculer pour chaque exploitation type le rendement agricole qui optimise la marge brute sur un hectare pour chacune des cultures possibles dans cette exploitation, puis le bénéfice économique de l'exploitation dans son ensemble en optimisant l'allocation de sa surface totale entre ces cultures. L'allocation des surfaces et les quantités d'intrants utilisées par hectare pour obtenir les rendements optimaux conduisent à des quantités d'intrants utilisés par l'exploitation. Le couplage AROPAj STICS nous fournit donc pour chaque exploitation type les assolements et les intrants en nitrate associés. Cependant, les données économiques décrivant les exploitations type ne sont a priori disponibles qu'au niveau des régions, et ne sont pas spatialisées au sein de la région. Par ailleurs, les fonctions de réponses calculées avec STICS sont obtenus dans des conditions qui peuvent ne pas être représentatives des conditions réelles du bassin de la Seine (par exemple, un nombre limité de types de sol est autorisé).

6.3. Principe et limitation du couplage du modèle agro-économique avec le modèle hydrogéologique

Le modèle hydrogéologique, pour simuler la contamination des nappes par les nitrates, a besoin d'une estimation spatialisée des intrants en nitrate. Ces flux d'intrants seront transférés vers la nappe en fonction de l'infiltration. Or ces flux sont calculés par AROPAj-STICS. On envisage donc dans un premier temps de réaliser un couplage léger, avec une simple utilisation des sorties de AROPAj-STICS en entrée de MODCOU.

Bien qu'a priori simple, cette approche pose deux problèmes majeurs : celui de la discrétisation spatiale, et celui de la discrétisation temporelle.

Pour spatialiser ces flux, on se propose de se baser sur des recoupements de données spatialisées disponibles. Deux méthodes sont possibles :

- une méthode probabiliste, basée sur les données physiographiques disponibles (occupation des sols issue de Corine Land Cover, Usage des sols issu du LUCAS- Land Use/Cover Area frame statistical Survey, altitude, ...); le principe de cette méthode est rappelé dans le chapitre du rapport consacré à l'économie agricole (Cantelaube et al., 2008)
- une méthode qui reste encore à développer et qui se baserait sur les données spatialisées disponibles sur les petites régions agricoles (RGA) ainsi que sur l'expertise de l'équipe SAD de l'INRA-Mirecourt

On envisage donc dans un premier d'utiliser la première méthode pour spatialiser les intrants estimés par AROPAj-STICS dans MODCOU.

Du point de vue de la discrétisation temporelle, le problème est également assez ardu. En effet les fonctions de réponse calculées par STICS permettent d'estimer un flux moyen annuel de nitrate lixivié, basé sur des conditions météorologiques d'une année particulière (celle pour laquelle les données du RICA sont disponibles). Ainsi, deux problèmes se posent :

- Il faut répartir le flux moyen annuel de nitrate dans l'année, afin de reproduire la dynamique des transferts en nitrate
- Il faudrait prendre en compte les variations annuelles des flux de lixiviation

Dans un premier temps, nous aborderons le problème posé par la répartition journalière du flux de lixiviation en se basant sur la climatologie des flux qui a déjà été calculé avec le modèle STICS-MODCOU (Ledoux et al., 2007). Cependant, cela ne permettra pas de prendre en compte les variations interannuelles.

Aussi, on peut imaginer que ce couplage léger évolue vers une forme plus couplée, où le modèle STICS servirait d'interface entre le modèle économique AROPAj et le modèle hydrogéologique MODCOU.

Ainsi, les fonctions de réponses calculées par STICS seraient toujours utilisées par AROPAj pour estimer les assolements et quantité d'intrant en nitrate. Mais, plutôt que d'utiliser les flux de lixiviation issus des réponses pré-calculées de STICS, ces assolements et quantité d'intrant pourraient être imposés dans une simulation STICS-MODCOU qui tournerait au pas de temps journalier, avec des conditions météorologiques cohérentes.

Si cette méthode permet une approche plus cohérente de la modélisation agro-hydrologique, il y a cependant des risques de divergences avec l'application économique, en particulier si les hypothèses faites sur la spatialisation sont mauvaises, ou si les conditions météorologiques sont très différentes : les rendements simulés dans l'application STICS-MODCOU pourraient alors être très différents de ceux estimés par AROPAj-STICS.

Avant d'arriver à ce point, il est donc important de tester le couplage léger. Par ailleurs, on ne pourra tester le second type de couplage que lorsque la future nouvelle version de STICS sera couplée à MODCOU, c'est-à-dire probablement pas avant la fin de l'année 2008.

Bibliographie

- Cantelaube P., Ducharne A., Habets F., Jayet P.A., Mignolet C., Philippe E., Schott C., Viennot P., Zakharov P. 2008 Modélisation économique des relations entre agriculture et environnement à l'échelle du bassin de la Seine, Rapport d'activité 2007 du PIREN Seine
- Cunge, J A 1969 On the subject of a flood propagation method (Muskingum method) J Hydr Res IAHR, 7, pp205-30
- Gomez E., 2002. Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique ; Application au bassin de la seine. Thèse, Ecole des Mines de Paris
- Guigon-Moreau E. 2006. Transferts des pesticides vers les eaux superficielles et l'atmosphère : Caractérisation et modélisation sur le bassin versant de la Vesle –Thèse : Université Paris VI - Pierre et Marie Curie, 251 p.
- Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Segui F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot, 2008, The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, Journal of Geophysical Research, sous presse
- Ledoux, E. Gomez, J.M. Monget, C. Viavattene, P. Viennot, A. Ducharne, M. Benoit, C. Mignolet, C. Schott and B. Mary, 2007, Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain, Science of The Total Environment Volume 375, Issues 1-3, Pages 33-47.
- Moreau Guigon E., Bacchi A., Botta F., Viennot P., Habets F. et Blanchoud H. 2008. Description du concept de fusion entre Phytodel et STICS-Phyto-MODCOU-NEWSAM pour la modélisation du transfert des pesticides vers l'atmosphère et les eaux de surface et souterraines. Rapport d'activité 2007 du PIREN-Seine
- Philippe E., Habets F., Ledoux E., Goblet P. et Viennot P. 2008 Transfert d'eau et de nitrate dans la zone non saturée : comparaison d'une modélisation simplifiée et d'une modélisation à base physique pour améliorer la simulation sur le bassin de la Seine. Rapport d'activité 2007 du PIREN Seine

Rat, A., E. Ledoux et P. Viennot. 2006. Transferts de pesticides vers les eaux souterraines, modélisation à l'échelle d'un bassin versant: cas d'étude du bassin amont de la Vesle. Rapport d'activité 2005 du programme PIREN-Seine, 116 p