

# Développement du modèle MODCOU dans le cadre d'Eau-dyssée

Florence Habets<sup>1</sup>, Emmanuel Ledoux<sup>2</sup>, Pascal Viennot<sup>2</sup>, Patrick Goblet<sup>2</sup>, Elodie Philippe<sup>2</sup>,  
Cédric David<sup>3</sup>, Alessia Bacchi<sup>4</sup>, Hélène Blanchoud<sup>5</sup>, Elodie Moreau-Guigon<sup>5</sup>, Otmane  
Souhar<sup>1</sup>, Nicolas Flipo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CNRS/UPMC UMR Sisyphe 7619, Fontainebleau,

<sup>2</sup> Mines-Paritech/Centre de géosciences UMR Sisyphe 7619, Fontainebleau, France

<sup>3</sup> Center for Research in Water Resources, University of Texas, Austin, USA.

<sup>4</sup> Univerità di Roma Sapienza, Roma, Italie.

<sup>5</sup> EPHE/UPMC UMR Sisyphe 7619, Paris, France

\*\* [florence.habets@mines-paristech.f](mailto:florence.habets@mines-paristech.fr)

## 1 Rappel des objectifs

Afin de traiter les questions des devenirs des pollutions des eaux, d'impact de pratiques agricoles ou de contraintes économiques, le besoin se fait sentir de faire évoluer la modélisation des hydrosystèmes vers une véritable modélisation intégrée. Cela nécessite donc de faire évoluer les modèles, afin d'une part de les rendre plus efficaces, pour pouvoir aborder des résolutions spatiales de plus en plus fines, et d'autre part de les rendre beaucoup plus interactifs, et via une gestion des couplages qui n'entrave pas l'évolution indépendante des modèles experts.

Dans le cadre de la modélisation du bassin de la Seine, nous travaillons au développement du modèle intégré EAU-DYSSEE. Ce modèle repose sur des couplages souples entre le modèle MODCOU et des modèles experts comme le modèle agronomique STICS, le modèle physique d'écoulement et de transport Métis, ou encore le modèle biogéochimique ProSe.

Or ces modèles experts ont tous récemment évolué pour être en phase avec les nouvelles capacités numériques et également pour acquérir une structure plus modulaire facilitant les couplages.

Ce travail de modernisation restait cependant à faire pour le modèle hydrogéologique MODCOU, qui rentrera en 2010 dans sa trentième année.

Ainsi, un travail important de « restructuration » de MODCOU a débuté, en parallèle avec le développement de nouveaux modules et/ou de la prise en compte effective de nouvelles interactions. Dans ce rapport, on se propose de faire le point sur l'état actuel de la restructuration de MODCOU (noté dans ce rapport MODCOU<sub>R</sub>), ainsi que sur les premiers travaux visant au couplage avec la nouvelle version de STICS dans le cadre d'Eau-dyssée.

## 2 Développements réalisés dans le cadre d'Eau-dyssée

Durant l'année 2008, plusieurs actions ont été menées dans le cadre du développement d'Eau-dyssée. Tout d'abord, nous avons avancé dans la restructuration de Modcou dont l'état actuel est présenté section 2.1. De plus, la nouvelle version est assez développée pour permettre le développement de nouveaux modules bénéficiant des nouvelles possibilités entre les éléments simulés. Ces nouveaux modules font chacun l'objet d'un rapport PIREN séparé et sont brièvement présentés section 2.2.

### 2.1 Restructuration de Modcou

Nous avons présenté l'année dernière les principes de recodage utilisés pour la ré-écriture de MODCOU (Habets et al., 2008). Les principales différences par rapport au modèle original sont :

- L'usage du fortran 90
- Une écriture vectorielle
- La gestion simultanée des modules, permettant donc la prise en compte d'interactions jusque là limitées.
- L'intégration de toutes les options possibles dans le même exécutable

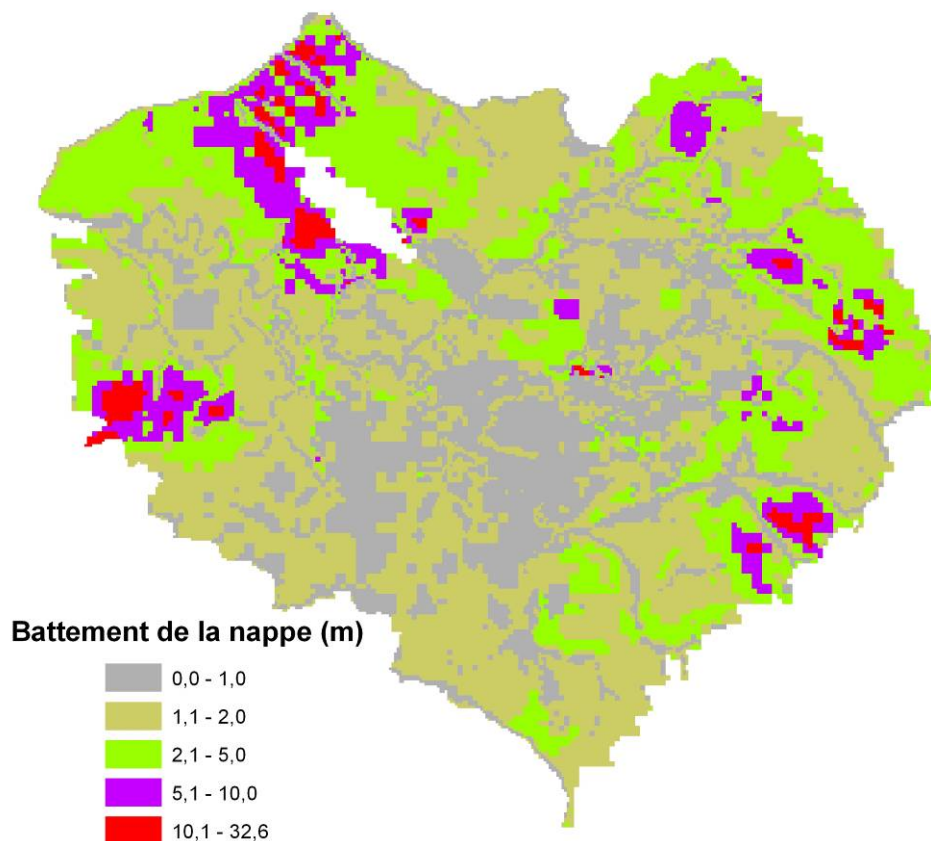
Par ailleurs, dans cette action de restructuration, les modèles MODCOU et NEWSAM seront fusionnés afin de profiter des atouts de chacun. Ces deux modèles, bien que très proches, ont des spécificités (par exemple : simulation des transferts convectifs de polluant en nappe pour NEWSAM et simulation des débits pour MODCOU), qui rend actuellement l'usage des 2 modèles nécessaires pour une même application. La fusion de ces deux modèles permettra donc une gestion plus aisée et une meilleure cohérence dans les simulations.

A ce jour, les éléments qui ont intégré la nouvelle structure de MODCOU sont :

1. le calcul du bilan hydrique par les fonctions de production
2. le calcul des transferts dans la zone non saturée, avec les options « transfert d'eau uniquement », ou « transfert d'eau et de polluant passif ».
3. les transferts d'eau en nappe

L'ensemble de ces 3 actions peut se dérouler simultanément, mais une option « flux imposés » est également possible afin de gérer facilement les tests de sensibilité et pour permettre de forcer le modèle à partir d'une autre source.

Un exemple des sorties de MODCOU<sub>R</sub> est présenté ci-dessous. La figure 1 illustre l'intensité du battement de la nappe c'est-à-dire, la différence entre le niveau piézométrique le plus haut et le plus bas sur l'année, simulée pour l'année 1981-1982 à l'équilibre. On constate que ce battement de nappe est supérieur à 2m sur 25% de la surface des nappes simulées, et supérieur à 10 m sur environ 1%.



**Figure 1 : Valeurs des battements de nappe obtenues par MODCOU<sub>R</sub> sur l'année 1981-1982 simulée à l'équilibre.**

Si la « restructuration » de MODCOU a avancé, il manque néanmoins des éléments essentiels, tel que la possibilité de gérer le transport convectif de polluant en nappe ou la possibilité de simuler les débits. Ces retards sont liés au fait qu' en 2008, nous avons beaucoup travaillé au développement de nouveaux modules, ou à l'amélioration des modules existants. Ainsi, les transferts dans la zone non saturée (ZNS) ont fait l'objet de 2 actions menées de façon indépendantes : la première vise à améliorer les interactions entre la nappe et la ZNS, et la deuxième, à introduire des processus réactifs lors de ces transferts. Une troisième action a consisté à améliorer la simulation des écoulements en rivière et les interactions entre nappes et rivières. Ces actions

sont décrites dans les paragraphes ci-dessous.

## **2.2 Amélioration des transferts dans la ZNS**

Cette action vise d'une part à évaluer l'approche assez conceptuelle utilisée initialement pour gérer les transferts dans la zone non saturée, et d'autre part, à intégrer les interactions entre la nappe et la ZNS qui sont rendues possible grâce à la version restructurée de MODCOU. L'idée principale est de faire évoluer l'épaisseur de la zone non saturée en fonction de la profondeur de la nappe en chaque point, et de prendre en compte explicitement les processus de lessivage par la nappe.

La simulation des transferts dans la ZNS utilisée jusqu'à présent par MODCOU est une approche assez simple, bien adaptée au besoin d'une modélisation sur de grands bassins. Des modifications avaient été apportées par Gomez (2002) pour gérer le transport de polluant passif dans la ZNS. Or, le peu de données disponibles n'avait permis qu'une validation subjective de cette modélisation. Comme nous nous proposons de faire évoluer ce module, il nous a semblé nécessaire de mieux valider son fonctionnement. Pour ce faire, nous avons choisi de comparer notre approche conceptuelle à celle d'un modèle plus physique, Métis (Goblet, 2007). Le modèle physique étant capable de gérer explicitement les battements de nappes, il est également utilisé pour développer et valider une représentation simplifiée de l'impact des fluctuations de nappes dans la ZNS. Ce travail fait l'objet d'un rapport PIREN-Seine (Philippe et al., 2009).

La comparaison avec le modèle à base physique a permis d'améliorer la gestion des transferts de polluant passif dans la ZNS, grâce à la prise en compte d'un profil de saturation entre la surface (peu saturée) et l'interface avec la nappe (très saturée). Le profil de saturation et la prise en compte des battements de nappe ont été intégrés en essayant de conserver une approche de modélisation homogène, ie, en restant relativement simple. Cependant, ces 2 processus nécessitent de définir de nouveaux paramètres, et de nouvelles sous-routines. Le temps de calcul reste malgré tout raisonnable, et bien inférieur à celui d'un modèle déterministe.

## **2.3 Développement d'un module de transfert réactif des pesticides dans la ZNS**

Par ailleurs, afin de mieux aborder les études de contamination des nappes et des rivières par les pesticides, il était nécessaire d'intégrer dans les transferts de la ZNS les processus réactifs qui peuvent modifier fortement la dynamique des transferts et modifier les formes des molécules. Ainsi, nous voulions prendre en compte le changement de phase (liquide et adsorbé), qui se produit à travers les processus d'adsorption/désorption lentes et rapides, ainsi que le processus de dégradation. Pour cela, il fallait résoudre deux difficultés majeures : i) conserver une approche cohérente entre un écoulement passif simple et processus réactifs, et ii) utiliser une représentation des processus réactifs compatible avec le peu de données existantes dans la zone non saturée... Deux approches ont été développées, et sont décrites en détail dans le rapport PIREN Bacchi et al., 2009. L'une de ces approches privilégie les échanges entre phases adsorbé et liquide, au dépend d'une bonne estimation des transferts en phase dissoute ; et l'autre néglige ces échanges et ne conserve que le processus de dégradation avec une bonne estimation des transferts en phase dissoute.

Des tests de sensibilité ont été réalisés sur une colonne d'eau virtuelle en considérant une contamination par l'atrazine et ses métabolites. On a pu constater la grande dépendance à des variables mal identifiées dans la zone non saturée profonde, comme la teneur en carbone organique. Les tests de sensibilité ont également montré que la première approche conduit à des transferts vers la nappe trop rapides et à une importante immobilisation des pesticides adsorbés dans la ZNS. La deuxième conduit à des transferts vers la nappe au bout d'un délai plus raisonnable et à une dégradation quasi complète de l'atrazine en métabolite, ce qui paraît peu réaliste.

On envisage donc dans une étape ultérieure de fusionner ces 2 approches en estimant les processus d'adsorption/désorption sur l'ensemble des réservoirs tout en gérant le transfert en phase dissoute via des strates comme dans la seconde approche.

Par ailleurs, ces développements seront réalisés dans la nouvelle version capable de gérer les battements de nappe (cf section 2.2)

## **2.4 Développement d'un nouveau modèle de routage en rivière**

Un nouveau schéma de transfert en rivière a été développé au cours de l'année 2008. Cela répondait à un besoin. En effet, l'approche utilisait jusqu'à présent dans MODCOU consistait à une gestion des transferts en

rivière via des biefs isochrones. Cela nécessitait la gestion de zones isochrones pour chaque station simulée, ce qui s'avère relativement lourd lorsque les bassins versants simulés contiennent un grand nombre de stations, ou lorsqu'une station de référence est déplacée (cas de la Seine à Poses). De plus, on soupçonne cette gestion par bief isochrone d'être responsable d'une mauvaise estimation des échanges entre la rivière et la nappe. Ainsi, nous avons développé un nouveau modèle avec comme principaux objectifs : i) d'être utilisable sur de grands bassins, même lorsque peu de données sont disponibles ii) de permettre l'estimation des débits et des volumes d'eau en tout point du réseau, iii) d'être évolutif (ie, dans le but d'estimer une hauteur d'eau en rivière), iv) d'être capable de gérer des réseaux en rivière sous forme raster ou vecteur, v) d'utiliser les nouvelles capacités informatiques.

Ainsi, le modèle RAPID a été développé (rapport PIREN David et al., 2009). Il est basé sur la méthode de Muskingum et utilise une écriture matricielle. Il utilise une librairie mathématique particulière afin de permettre le calcul parallèle et l'optimisation des deux paramètres du modèle.

Ce modèle a d'ores et déjà été couplé à une version de MODCOU utilisée à Météo-France, et relativement proche de celle qui est intégrée dans la plateforme Eau-dyssée. L'intégration de RAPID dans SIM-France a permis de tester la robustesse du modèle sur l'ensemble des bassins français. Cette intégration a également permis d'étudier plus finement l'estimation des relations nappes-rivières, ce qui a conduit à une modification de la méthode de calcul et une meilleure fermeture des bilans.

Nous visons maintenant à intégrer très rapidement RAPID dans Eau-dyssée.

### **3 Le point sur les développements en cours**

#### **3.1 Prise en main du coupleur PALM**

Nous nous proposons dans le cadre d'Eau-dyssée, de coupler des modèles experts en permettant une complète interaction (et pas uniquement un forçage d'un modèle par un autre), tout en utilisant une méthode la moins intrusive possible afin de permettre à chaque modèle expert d'évoluer indépendamment. L'exemple le plus représentatif est celui du couplage entre le modèle agronomique STICS et le modèle hydrogéologique MODCOU. En effet, on s'est contenté pour les thématiques de pollution en nitrate d'un forçage de MODCOU par les sorties de STICS. Cependant, cela a tout de même nécessité de nombreuses modifications dans STICS, qui ont rendu ce couplage peu souple. Or, un tel couplage, limité à un forçage, ne permet pas par exemple de rétroaction de l'hydrologie vers la parcelle agricole. Ainsi, l'irrigation utilisée dans STICS est indépendante des ressources disponibles, simulées par MODCOU.

Dans le cadre d'Eau-dyssée, on se propose de réaliser les couplages entre modèles externes à l'aide d'un coupleur spécialisé. Pour cela, on envisage d'utiliser le coupleur PALM (Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes) du Cerfacs ([www.cerfacs.fr/~palm](http://www.cerfacs.fr/~palm)). Palm est un coupleur dynamique parallèle très largement utilisé dans la communauté climatique pour effectuer les couplages entre des modèles d'océan, de banquise et d'atmosphère. Ce coupleur bénéficie d'une certaine maturité et de nombreuses expériences. Les interfaces graphiques dont il est paré facilite grandement son utilisation (cf figure 2). Un autre atout de Palm est qu'il peut être utilisé pour l'assimilation de données.

Palm est mis à disposition gratuitement à la communauté scientifique par le CERFACS, qui assure également des formations (payantes). Deux chercheurs ont participé à la dernière session de formation. La convention d'utilisation est en cours de signature, et nous devrions donc disposer d'ici peu du code et être capable de réaliser les premiers essais.

On envisage dans un premier temps d'utiliser PALM entre 2 modules de MODCOU<sub>R</sub>, afin de bien prendre en main l'outil et de tester les avantages et inconvénients, notamment sur le temps calcul.

On passera ensuite au couplage entre MODCOU<sub>R</sub> et la nouvelle version du modèle agronomique STICS.

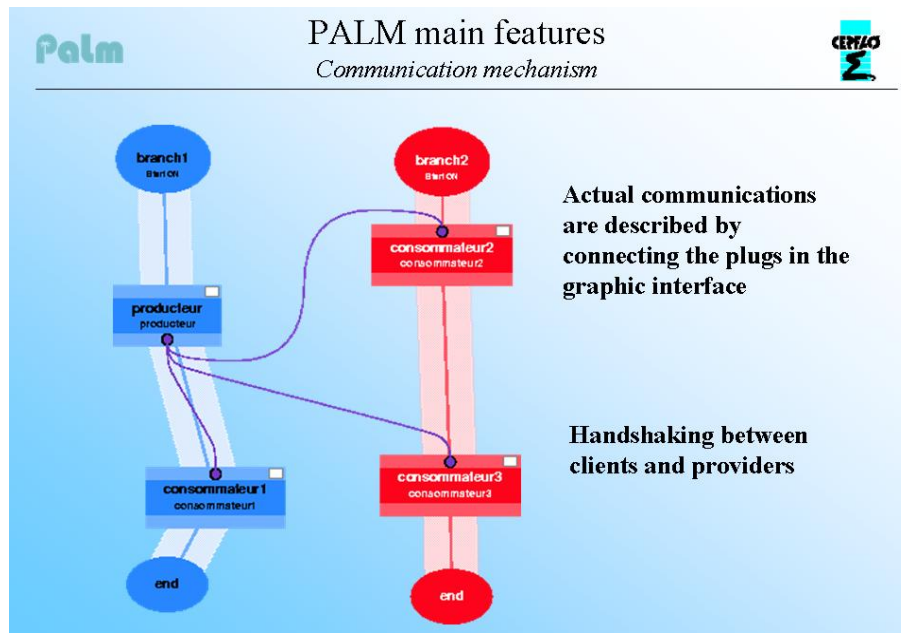


Figure2 : Exemple de la connexion entre 2 modèles avec PALM. Ces connexions sont gérés par l'interface graphique PréPalm (extrait de Piacentini et Morel 2007)

### 3.2 Prise en main de la nouvelle version de STICS

Le modèle STICS (Brisson et al., 1998) a subi une évolution importante au cours des derniers mois, et la nouvelle version de STICS, codée en Fortran95 doit permettre une utilisation spatialisée (utilisation de vecteur), modulaire, et intégrer un plus grand nombre de culture. Cette version aurait due être disponible en 2008, mais, des retards ont été pris. On devrait cependant recevoir d'ici peu cette nouvelle version 7.0 tant attendue.

Une prise en main de cette nouvelle version sera nécessaire avant de réaliser le couplage avec MODCOU via Palm. Il s'agira tout d'abord de vérifier la compatibilité avec les bases de données développées dans le cadre du PIREN-Seine (Schott et al., 2006, 2004). Ensuite, il faudra intégrer si besoin les instructions pour rendre ce code parallèle. On pourra alors comparer les résultats de l'ancienne version STICS avec la nouvelle, et envisager ensuite le couplage avec MODCOU<sub>R</sub> via Palm

## 4 Organisation pour la suite du programme

L'année 2009 devrait voir se terminer la phase de restructuration de MODCOU (et de NEWSAM), et les premiers couplages avec des modèles experts.

A ce jour, Eau-dyssée est essentiellement engagé dans des études concernant la ressource en eau (changement climatique, irrigation) pour lesquelles la prise en compte de meilleurs interactions entre la surface, la ZNS, la nappe et les rivières peuvent avoir un impact important, ainsi que dans des études de la pollution diffuse des hydrosystèmes (pollution par les nitrates ou les pesticides, impact de mesures agro-économiques sur ces pollutions).

Ainsi, le développement d'Eau-dyssée mobilise à ce jour une demi-douzaine de personnes au Centre de Géosciences, et quelques personnes à l'UMR-Sisyphé. Il devient donc important de gérer le développement de ce modèle de façon cohérente et compatible par rapport aux activités de chacun. A cette fin, nous avons établi un programme de développement sur l'année qui sera soumis au projet PIREN 2009.

Il s'agira tout d'abord, de finir l'intégration des différents modules de MODCOU/NEWSAM dans MODCOU<sub>R</sub>. En particulier, il faut intégrer un modèle de routage en rivière (nous commencerons par implémenter RAPID), ainsi qu'un module de transport convectif en nappe. Puis, on souhaite travailler sur les pré et post-processing, en se basant sur un outil interne déjà bien développé : COMET. En effet, même si le développement d'un module de pré et post-processing est souvent coûteux en temps humain, il est malgré tout rentable lorsque le nombre d'utilisateurs est important (le problème étant de définir à partir de quel nombre d'utilisateurs l'investissement devient rentable). Par ailleurs, on espère limiter la quantité des

développements via l'usage de COMET, qui est un logiciel interne déjà performant et largement utilisé par les modélisateurs.

Avec ces nouveaux développements, on souhaite pouvoir gérer de façon homogène les actions suivantes:

- Evaluation de l'impact d'une meilleure interaction nappe/ZNS sur la contamination des nappes par les nitrates ;
- Couplage avec STICS et premiers tests sur le bassin de la Seine ;
- Fusion des modèles de pesticides Stics-phyto (Rat et al., 2006) et Phytodel (Guigon-Moreau 2006) avec la nouvelle version de Stics et premiers tests de sensibilité ;
- Développement de l'application sur le Grand Morin dans le cadre des zones humides (certains problèmes devront être abordés tel que la gestion de modèles emboîtés) ;
- Amélioration du modèle de routage en rivière via l'estimation des hauteurs d'eau et évaluation des impacts sur les relations nappes/rivières.

## Références

Bacchi A., F. Habets, H. Blanchoud, E. Moreau-Guigon, E. Ledoux, P. Viennot 2009, Modélisation des transferts de pesticide dans la zone non saturée

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J. M., Meynard, J. M., and Delecolle, R. (1998c). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346

David, C., F. Habets, E. Ledoux, 2009, Développement du modèle de routage en rivière RAPID : (Routing Application for Parallel computation of Discharge) : principe et intérêt du couplage avec MODCOU pour la gestion des relations nappes-rivières, Rapport 2008 du PIREN-Seine

Goblet P., (2007). Spécifications pour la simulation de l'écoulement en zone non saturée. Rapport final. IRSN/DSU/SSIAD.

Guigon-Moreau E., 2006. Transferts des pesticides vers les eaux superficielles et l'atmosphère

Habets F., E. Ledoux, P. Viennot, E. Philippe, C. David, E. Moreau Guigon, H. Blanchoud, P-A. Jayet, A. Bacchi, P. Zakharov, 2008 Evolution du modèle hydrogéologique MODCOU et stratégie de couplage avec un modèle économique et un modèle de pesticide Rapport 2007 du PIREN-Seine

Piacentini A. et T. Morel, PALM: A Dynamic Parallel Coupler, ESF - NinE Meeting, Rennes, 11-12 novembre 2007

Philippe E., F. Habets, E. Ledoux, P. Goblet, P. Viennot, 2009, Prise en compte du battement de nappe dans la modélisation du transfert de nitrates sur le bassin de la Seine, Rapport 2008 du PIREN-Seine

Rat A., Ledoux E., Viennot P., 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. Report 2005 of Piren Seine recherche program: 116 p.