

Les progrès de la modélisation intégrée

Florence Habets^{1,2}, Nicolas Flipo², Firas Saleh^{1,2}, Elodie Philippe², Wilfried Queyrel^{1,2},
Patrick Goblet², Emmanuel Ledoux², Céline Monteil², Pascal Viennot², Cédric David^{2,3},
Alessia Bacchi^{1,*}, Hélène Blanchoud¹, Elodie Moreau-Guigon¹, Marie Launay⁴,
Dominique Ripoche⁴, Bruno Mary⁵, Pierre-Alain Jayet⁶, Eric Martin⁷, Thierry Morel⁸,
Julien Tournebize⁹

¹ UMR Sisyphe, Paris (CNRS/EPHE/UPMC)

² Centre de Géosciences MINES-ParisTech, Fontainebleau

³ Austin University, Texas, USA

⁴ INRA Agroclim, Avignon

⁵ INRA Agroimpact, Laon

⁶ INRA Economie Publique, Grignon

⁷ CNRM/GAME Météo-France, Toulouse

⁸ Cerfacs, Toulouse

⁹ CEMAGREF Anthony

* actuellement en poste à Véolia

personne à contacter : florence.habets@mines-paristech.fr

1 Introduction

L'objectif d'une modélisation intégrée est de traiter les problématiques concernant la ressource en eau (en termes de quantité et de qualité) en combinant les différentes disciplines la caractérisant : météorologie, hydrologie, agronomie, biogéochimie, économie. En effet, la ressource en eau est affectée par l'anthropisation, qu'il s'agisse des modifications de l'occupation du sol et/ou les aménagements hydrologiques, ou des activités générant des pollutions ponctuelles ou diffuses qui vont être transférées dans l'hydrosystème en fonction en particulier des caractéristiques météorologiques. Les polluants sont sujet à des processus biogéochimiques qui les conduisent à se transformer en divers sous produits. Ainsi, les différents éléments de l'hydrosystème interagissent les uns avec les autres (Figure 1), ce qui incite les chercheurs à bâtir une modélisation plus intégrée de l'hydrosystème.

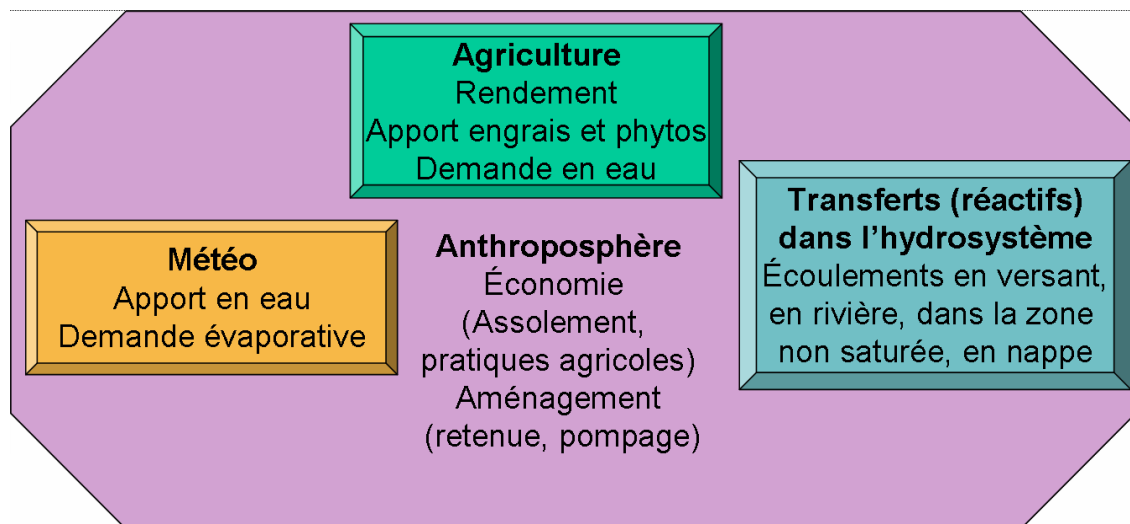


Figure 1 Interaction entre différents éléments de l'hydrosystème

C'est pourquoi les équipes du Cemagref, du Cerfacs, de l'INRA, de Météo-France, de MINES-ParisTech et de l'UMR Sisyphe se sont associées pour travailler au développement d'une modélisation intégrée de l'hydrosystème dans le cadre du projet Eau-dyssée avec le soutien du PIREN-Seine, de l'INSU, du CNRS, de R2DS et de l'ANR Vulnar (c.f. [site web Eau-dyssée](http://www.eau-dyssee.fr)).

Le projet vise à développer un outil modulaire, évolutif, interactif et numériquement performant, capable de

simuler les différents processus affectant l'hydrosystème via le couplage avec des modèles disciplinaires.

Eau-dyssée s'appuie sur les expériences et les compétences acquises via les couplages déjà réalisés entre plusieurs modèles disciplinaires, et en particulier sur le couplage hydrométéorologique SIM, le couplage agro-hydrologique Stics-Modcou (Gomez et al., 2003, Ledoux et al., 2007) et le couplage agro-économique AROPAj-Stics (Godard et al., 2008). Ces expériences ont relevé d'une part le besoin d'avoir un couplage évolutif, c'est à dire ne figeant pas les modèles dans une version donnée et pouvant intégrer des modules (ou des modèles) adaptés à des problématiques spécifiques, et d'autre part la nécessité de faciliter les interactions. Eau-dyssée a donc pour objectif d'améliorer les couplages existants en les rassemblant dans un outil commun. Pour cela, nous nous appuyons sur le coupleur externe Palm du Cerfacs (Piacentini et al., 2003), qui a récemment évolué vers une forme libre nommée [Open-Palm](#). Nous visons ainsi le couplage entre un modèle hydrogéologique pour traiter le principal vecteur de distribution de l'eau, doté de représentation de la biogéochimie pour le transport des polluants diffus (engrais, phytosanitaire) dans l'hydrosystème, un schéma de surface atmosphérique pour une bonne estimation des bilan d'eau et d'énergie en surface qui est capable de simuler l'interaction nappe-surface et la reprise évaporative lorsque la nappe est proche de la surface, un modèle agronomique pour bien gérer les surfaces agricoles, les relations entre pratiques agricoles, ressources en eau et rendement agricole, un modèle économique, pour être capable de gérer certains scénarios agro-économiques.

Une partie du travail à mener est relativement technique: couplage et parallélisation de certain modèles pour améliorer les temps de restitution des simulation, cependant, ce travail technique permet d'introduire assez de souplesse dans le code pour intégrer et donc étudier de nouveaux processus. La première phase dans la construction d'Eau-dyssée a consisté à restructurer le modèle hydrogéologique MODCOU (Ledoux, 1984) pour le rendre plus modulaire et lui permettre de gérer de multiples interactions. Les développements réalisés sont présentés section 2. La seconde phase consiste à réaliser le couplage entre MODCOU et les autres modèles experts au sein d'Eau-dyssée (cf sections 3 et 4).

2 Le développement du modèle MODCOU

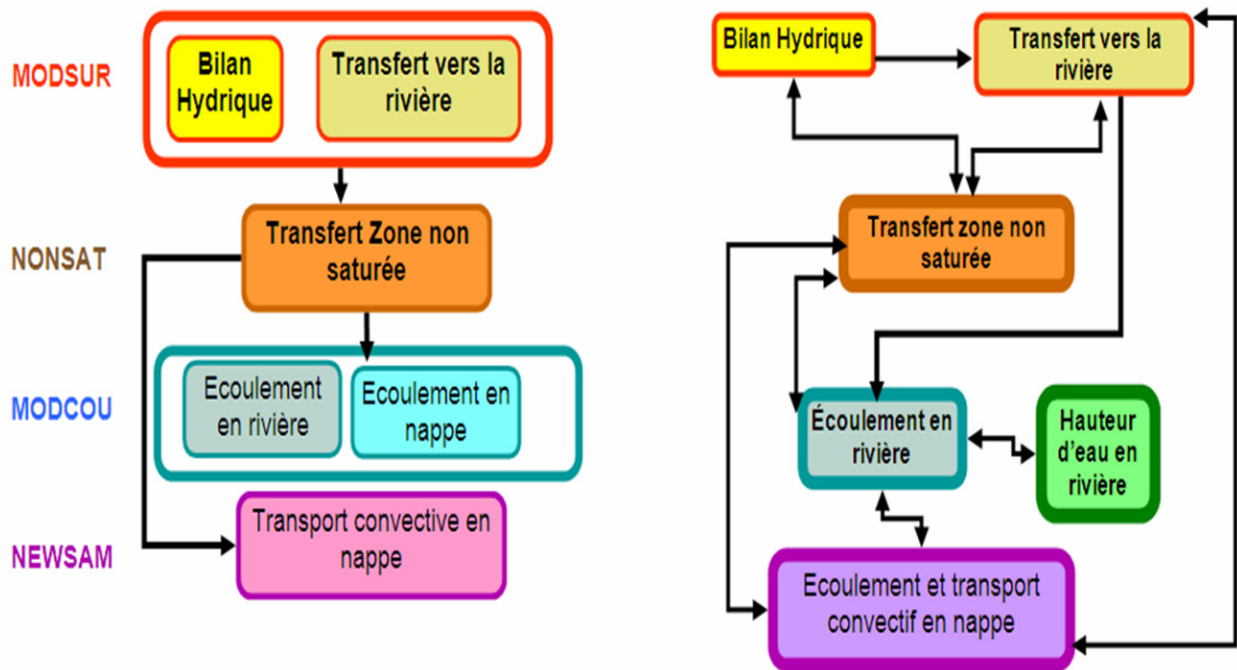


Figure 2 Structure de la version originale de MODCOU à gauche, constituée de 4 exécutables, et version développée dans le cadre d'Eau-dyssée à droite

La Figure 2 présente une comparaison des structures de MODCOU dans sa version initiale et celle développée dans Eau-dyssée. La version d'origine était constituée de 4 parties indépendantes (c.à.d. 4 exécutables) : Modsur pour l'estimation du bilan hydrique en surface et le routage vers la rivière, Nonsat pour les transferts dans la zone non saturée, MODCOU pour l'estimation des écoulements en nappe et les écoulements en rivière, et enfin NEWSAM pour l'écoulement et le transport convectif en nappe.

Chacune de ces quatre parties devait tourner sur la totalité de la période, et transmettait ensuite les flux aux modules suivants via l'écriture de fichiers de sortie. La nouvelle version conserve les différents éléments constitutifs du modèle hydrologique tout en intégrant de nouvelles interactions. Notons également que certains éléments ont évolué. Ainsi, nous avons introduit un nouveau schéma d'écoulement en rivière (RAPID), fusionné l'écoulement et le transport en nappe dans un seul et même module capable de gérer plusieurs polluants simultanément (ce qui est nécessaire pour gérer les produits phytosanitaires et leurs produits de dégradation), apporté des modifications au schéma de transfert dans la zone non saturée afin d'améliorer les transferts de polluants et de gérer les battements de nappe, et enfin introduit un nouveau module permettant d'estimer les hauteurs d'eau en rivière.

2.1 Amélioration des transferts en zone non saturée et de ses interactions avec la nappe

La zone non saturée est constituée de deux parties : celle englobant la zone racinaire, qui fait l'objet de toutes les attentions des schémas de surface et des modèles agronomiques, et celle située entre la zone racinaire et la nappe, qui est souvent moins bien connue, mais, qui joue un rôle important sur les transferts en eau et en matière soluble.

L'équation de Richards régissant les écoulements dans cette zone est relativement coûteuse à résoudre. Bien que des méthodes numériquement plus performantes existent (Ross, 2003), la zone non saturée est souvent représentée de façon simple dans les modèles hydrogéologiques appliqués à des grands bassins tels que

MARTHE, ou MODCOU (Besbès et de Marsily 1984, Thiery 2004).

Nous avons travaillé sur la représentation des transferts de polluants passifs dans la zone non saturée (ZNS). En effet, la ZNS peut avoir un impact important sur les temps de transfert d'un polluant vers la nappe (facilement plus de 30 ans sur le bassin de la Seine, cf Figure 4). Dans MODCOU, la représentation des transferts dans la ZNS est très simplifiée. Elle repose sur une cascade de Nash (Besbès et de Marsily., 1984) dans laquelle le transport de polluants est géré via des strates transférées par effet piston (Gomez et al., 2003). Afin d'améliorer le transport de polluants, nous avons modifié le profil de saturation de ces cascades de Nash, en introduisant les profils de Van Genuchten (1980) qui décrivent une relation entre la profondeur de la nappe et la saturation. Nous avons testé ce schéma sur le bassin de la Seine, en déterminant les paramètres de Van Genuchten à partir des paramètres de la littérature (Carsel et Parrish, 1988, Brouyere et al., 2004). Nous avons validé ce schéma simplifié par comparaison à un modèle physique, Métis (Goblet 1984) basé sur l'équation de Richards et utilisant la méthode des éléments finis, et via des comparaisons avec des observations.

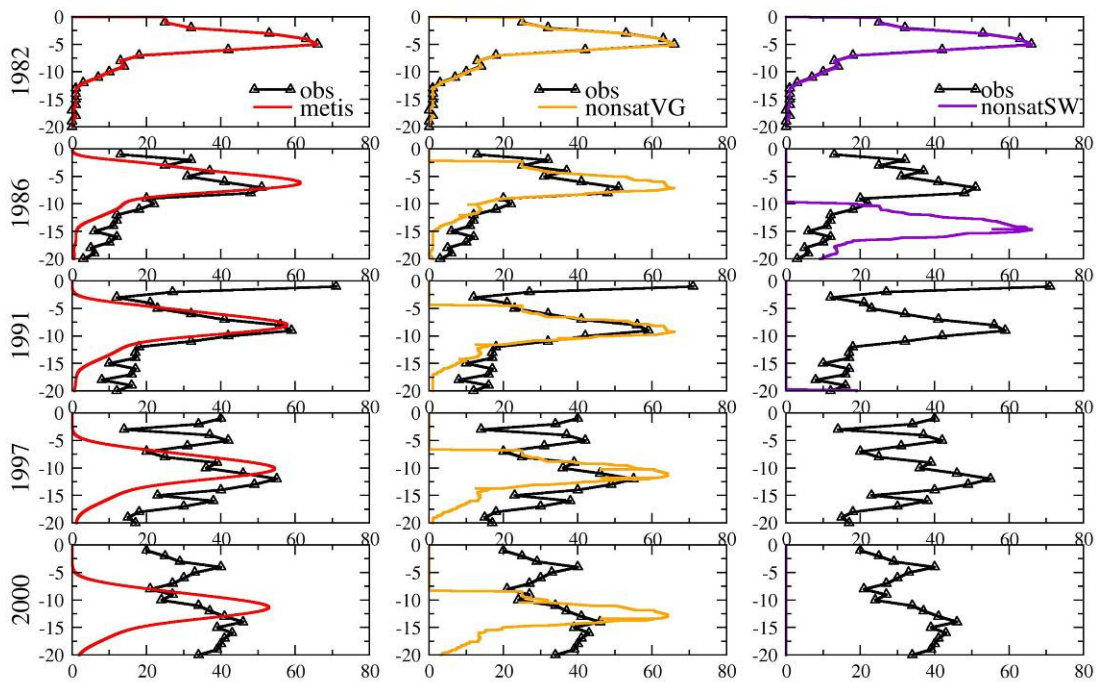


Figure 3 Comparaison des concentrations en nitrate observées et simulées à différentes dates (de 1982 en haut à 2000 en bas) en fonction de la profondeur (ordonnée: profondeur en m), sur le site expérimental d'Haussimont géré par l'INRA. Les observations sont présentées avec des triangles noirs, et les simulations en couleur: à gauche, les résultats obtenus par le modèle à base physique Métis, au centre, la nouvelle version du schéma de transfert dans la ZNS, et à droite, ceux obtenus par l'ancienne version (figure issue de Philippe et al., 2010).

Ainsi, la Figure 3 montre que l'ancienne version (en violet) conduisait à sous-estimer le temps de transfert du polluant dans la zone non saturée (le pic traverse les 20 m du profil en un peu moins de 6 ans alors que la vitesse de transfert est de l'ordre de 1m/an dans les observations). La nouvelle version (en jaune) présente une meilleure dynamique, même si il reste des écarts par rapport aux observations, et se rapproche des résultats obtenus avec le modèle à base physique Métis.

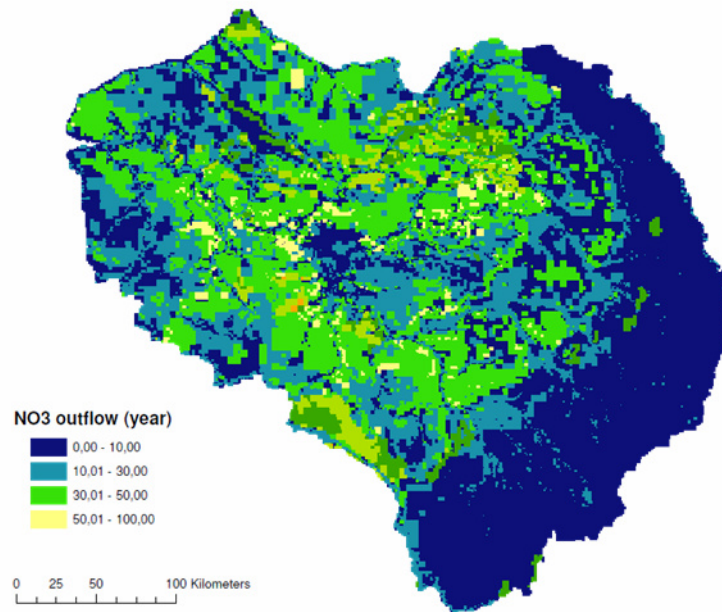


Figure 4 *Durée nécessaire à un polluant passif (de type nitrate) pour traverser la zone non saturée sur le bassin de la Seine simulée par la nouvelle version du module non saturée de MODCOU (figure issue de Philippe2010)*

Nous avons poursuivi cette étude afin de prendre en compte les interactions entre zone non saturée et zone saturée dans le modèle MODCOU. En effet, les alternances entre années sèches et humides peuvent conduire à un lessivage de certains polluants dans la zone de battement de nappe. Par ailleurs, le changement climatique risque de se traduire par une baisse marquée du niveau piézométrique, et donc par une augmentation de l'épaisseur de la zone non saturée. Cela va donc se traduire par une modification des temps de transfert des polluants vers la nappe.

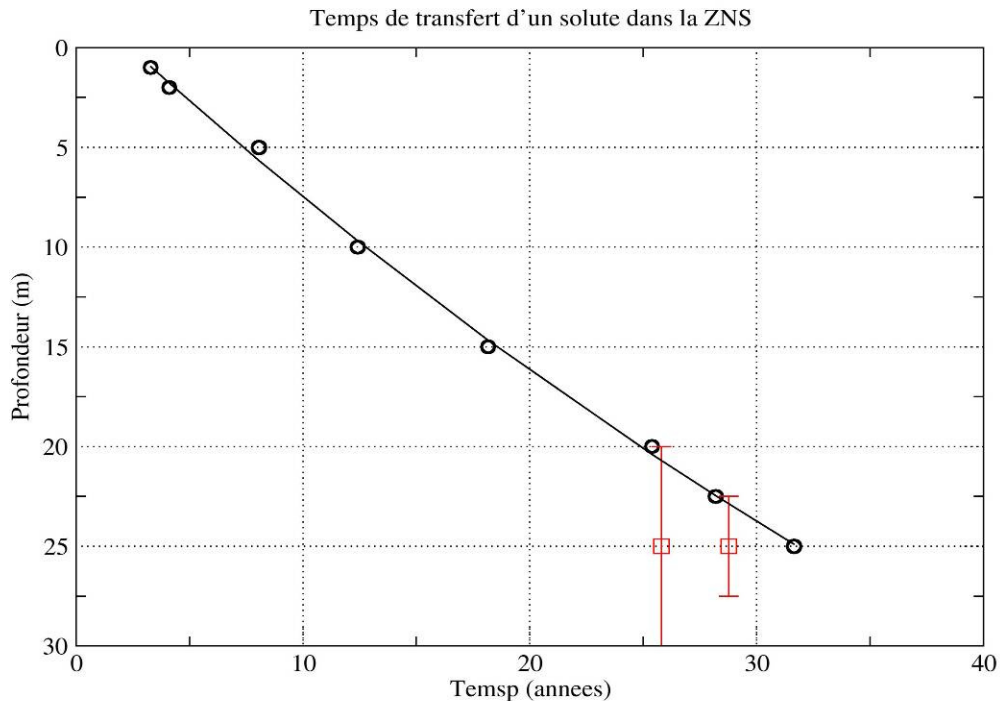


Figure 5 *Temps de transfert d'un soluté dans la zone non saturée en fonction de la profondeur de celle-ci, lorsque le niveau de la nappe est constant (cercles noirs), et avec un battement de nappe annuel de 2.5 et 5m (carré rouge avec la barre de variation). Figure issue de E. Philippe 2011*

Des tests de sensibilité ont été réalisés avec le modèle à base physique Métis sur l'impact de ces battements de nappe. Ces tests sont réalisés sur une colonne supposée homogène, avec une infiltration variable. Le battement de la nappe est supposé avoir un cycle annuel, et une amplitude égale chaque année. La zone saturée étant limitée à cette colonne, il ne peut pas y avoir d'écoulements horizontaux. On se limite donc à estimer un temps de transfert jusqu'à la première atteinte de la zone saturée, sachant que le battement de nappe dans les conditions de ce test redépose une quantité de soluté dans la zone non saturée lors de la descente de la nappe. Les deux tests de sensibilité ont été réalisés avec un niveau moyen de la nappe à 25m, et un battement de 2.5m ou de 5m. On constate que dans les deux cas, le temps de transfert ne correspond pas à celui de la profondeur moyenne (25m), mais, à celui du niveau haut de la nappe, soit, un transfert plus rapide de près de 3 et 5 ans pour les battements de 2.5 et 5m respectivement.

Si l'on suppose que les solutés sont ensuite totalement transférés par la nappe, cela valide l'approche suivie dans CaWaQS (Flipo et al., 2007) qui simule le réessuyage de la zone non saturée par les battements de nappe. Par contre, dans la version actuelle de MODCOU, où il n'y a pas d'interactions entre les zones non saturées et saturées, cela indique qu'il faudrait estimer la profondeur de la zone non saturée non pas en fonction du niveau moyen de la nappe (régime permanent actuellement utilisé), mais, en fonction des niveaux hauts atteints fréquemment.

L'idéal est cependant de faire interagir les deux zones, afin de prendre en compte des évolutions des profondeurs sur le long terme. Cela est malaisé dans MODCOU pour lequel le formalisme conduit à modéliser de façon indépendante ces deux zones, notamment avec des propriétés physiques différentes, alors qu'elles sont profondément connectées. Ainsi, si la nappe descend, la ZNS va céder de l'eau à la nappe et donc ralentir la descente de cette nappe (inversement pour une montée).

Les outils permettant la modélisation conjointe de ces deux zones existent tel Hydrogéosphère ou Métis (Therrien et al., 1996, Goblet 1984). Ces modèles à base physique ont l'avantage de représenter de façon cohérente et homogène les zones saturées et non saturées. Cependant, ils restent encore mobilisables uniquement sur des petits bassins versants et/ou sur des durées limitées. Dans d'autres modèles comme LIQUID, la zone non saturée et la zone saturée sont représentées par des formalismes assez différents, et Dehotin (2007) a développé un couplage basé sur les échanges de flux via un facteur de conversion permettant de prendre en compte les différences entre la porosité utilisée dans la ZNS et la porosité efficace utilisée dans la nappe. Pour prendre en compte ces interactions, nous pensons développer une approche différente de celle de LIQUID, en intégrant la notion de coefficient d'emménagement variable. Cependant, le passage sur un grand bassin, risque de nécessiter un recalibrage des paramètres hydrodynamiques, et notamment le coefficient d'emménagement considéré jusque là comme constant.

Bien que nous ayons actuellement peu travaillé sur les transports réactifs dans la zone non saturée, une étude préliminaire a été réalisée pour prendre en compte les processus d'adsorption/désorption et dégradation des pesticides dans la ZNS (Bacchi et al., 2009). Cette étude a mis en évidence la difficulté de représenter ces processus dans un modèle simplifié. Toutefois, les données recueillies sur le bassin versant de l'Orgeval dans le cadre du projet EC2CO Phyt'Oracle a montré la dominance des processus d'adsorption/désorption dans la ZNS par rapport à la dégradation. Cela nécessite de gérer les stocks de pesticides adsorbés à chaque profondeur, ce qui est difficile avec la version de Nonsat actuellement utilisée, puisque les strates simulées ne sont pas associées à une profondeur donnée. La question du développement de Nonsat, ou du passage à un autre type de modèle se posera donc.

2.2 Simulation des interactions nappe-rivière

L'utilisation d'un modèle hydrogéologique comme MODCOU, qui simule de manière simultanée les débits et les niveaux piézométriques, permet d'avoir une estimation explicite des relations nappes-rivières. Initialement, le schéma de routage en rivière était un simple modèle linéaire, où les mailles rivières étaient agrégées par bief "isochrone", ie, par zone où le temps de transfert est de l'ordre d'un jour. Ainsi, le transfert était calculé par bief, mais les relations nappe-rivière étaient calculées pour chacune des mailles rivières connectées à une maille aquifère. Cela conduit à un système où l'eau contenue dans un bief doit être répartie au sein du bief. Ainsi, si le bief inclus plusieurs affluents, il est possible que de l'eau soit transmise d'un affluent à un autre.

Afin d'améliorer l'estimation des relations nappe-rivière, ie, de disposer du volume en rivière réellement

disponible en chaque point, et également afin de pouvoir estimer le débit en chaque point, nous avons remplacé ce modèle par un modèle de type Muskingum.

Le schéma de routage en rivière RAPID (David et al., 2011) a été développé dans l'optique de travailler sur de grands bassins versants, avec un effort particulier apporté aux calculs sur de grands domaines via l'utilisation du calcul parallèle, et via l'inclusion d'un module d'optimisation permettant d'estimer les paramètres du modèle. La méthode d'optimisation des paramètres a été testée sur l'ensemble de la France dans le cadre du projet SIM-France (David et al., 2011). Cependant le schéma de Muskingum suppose des vitesses de propagation constantes ainsi que des hauteurs d'eau constantes dans le temps pour une section donnée.

Pour palier ce problème une méthode originale de changement d'échelle a été développée (Saleh, 2010 ; Saleh et al., 2011) via le développement du module Q2Z qui permet d'estimer des hauteurs d'eau en toute maille du réseau via l'utilisation de courbes de tarage estimées par ailleurs. En effet, Ces courbes de tarage peuvent être soit observées, soit simulées par un modèle hydraulique de plus petite extension spatiale. Les échanges nappe-rivière étant proportionnels à la différence de charge entre la rivière et la nappe, le module Q2Z permet une meilleure estimation de ces échanges. La Figure 6 illustre cet aspect sur un tronçon de rivière.

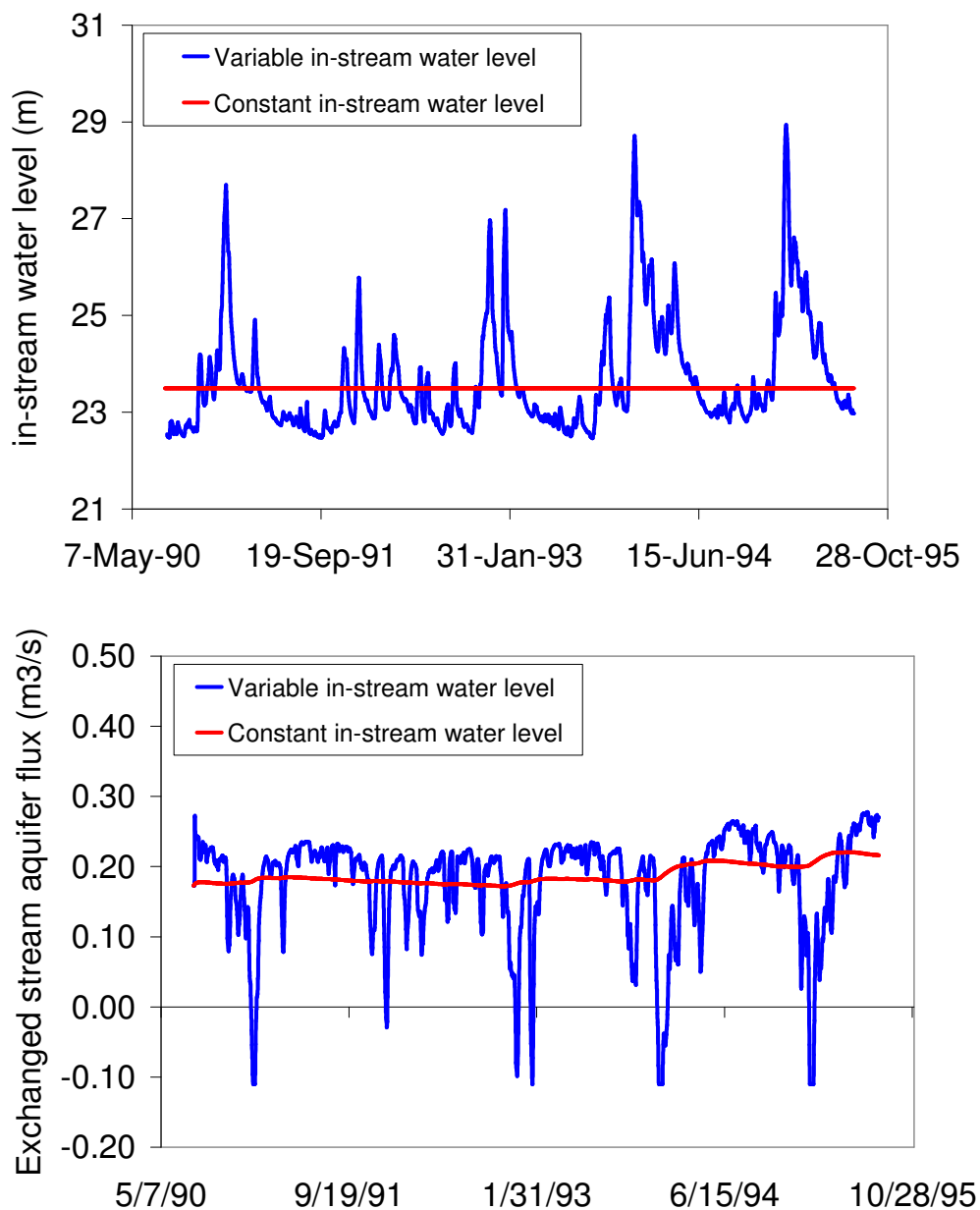


Figure 6 Evolution des hauteurs d'eau simulées et des échanges nappes-rivières

simulés pour une maille rivière à proximité de Percy (cf Figure 8). En rouge : hauteur d'eau fixe en rivière ; en bleu : hauteur d'eau variable en rivière (d'après Saleh, 2010)

Cela conduit à une meilleure estimation des niveaux piézométriques et des débits. La Figure 7 présente l'impact sur le piézomètre de Percy dans l'Oise, alors que la Figure 8 montre l'impact de ce processus à l'échelle régionale. On constate que la modification des échanges nappe-rivière peut modifier significativement la piézométrie de la craie sur une distance de plus de 25km.

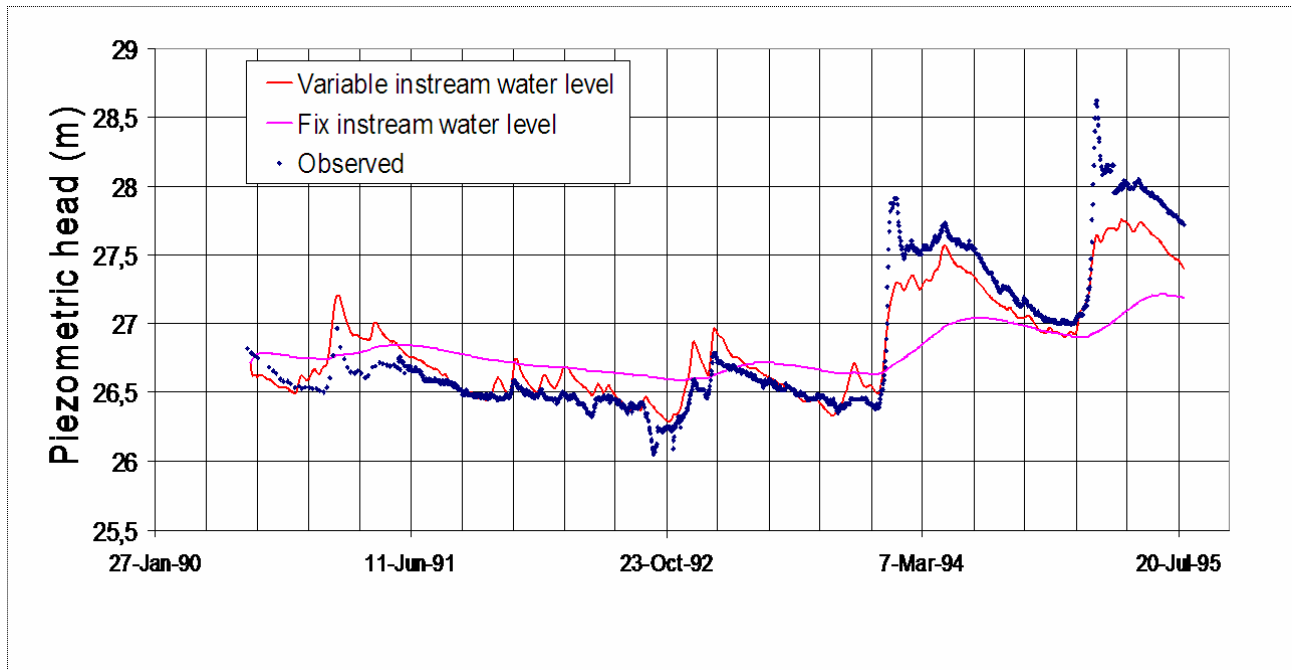


Figure 7 Niveaux piézométriques observés à Percy (noir) et simulés avec (rouge) et sans (bleu) la prise en compte d'un niveau variable en rivière (figure issue de Saleh et al., 2011). Le site de Percy est localisé Figure 8

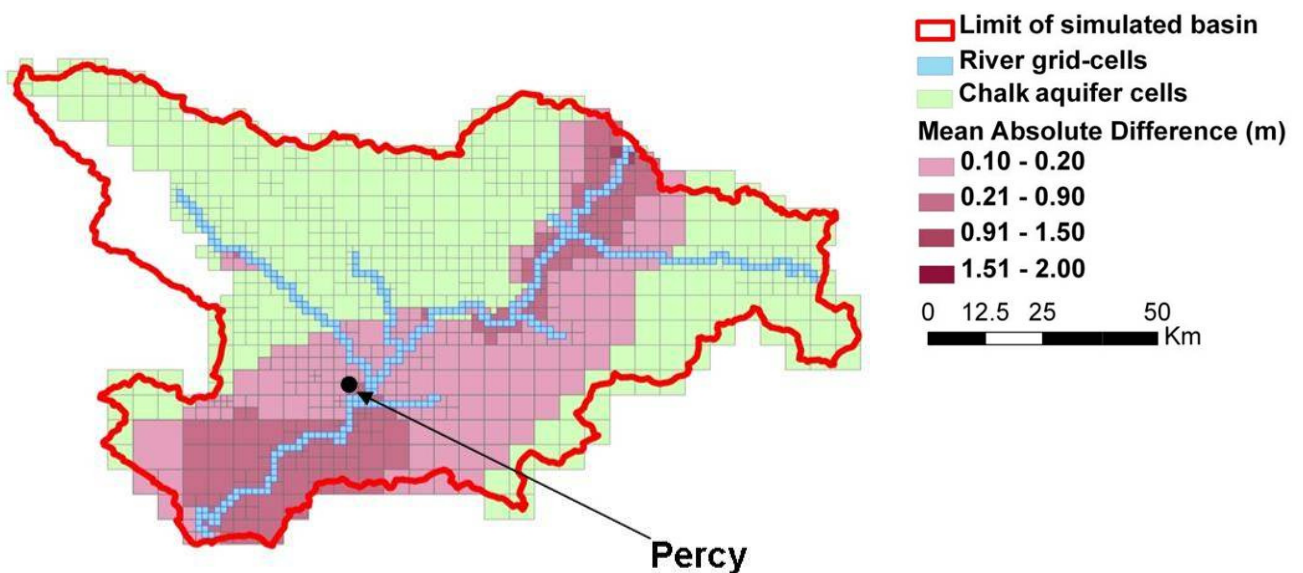


Figure 8 Impact de la hauteur variable de la nappe sur la piézométrie de la craie (figure issue de Saleh et al., 2011).

Il est donc prévu d'étendre l'utilisation de ce module sur l'ensemble du bassin de la Seine, ce qui permettra de mieux simuler le contenu en eau des zones d'interface nappe-rivière au cours du temps et donc d'être à même de mieux y simuler le cycle des polluants.

3 Le développement du couplage avec l'agronomie

L'agriculture représente une part importante de l'occupation des sols, et constitue aussi une source majeure de pollution via les intrants d'origine agricole. Ainsi, le couplage agro-hydrologique doit permettre de traiter la problématique de la pollution diffuse de l'hydrosystème par les nitrates ou par les produits phyto-sanitaires, ainsi que la problématique de l'irrigation, afin de gérer l'adéquation de la demande en eau des plantes avec les ressources réellement disponibles. Il y a de nombreux exemples de couplages agro-hydrologiques notamment en France (TNT, 2SWEM, Stics-MODCOU, CAWAQS, Beaujouan et al., 2001, Peyrard et al., 2008, Ledoux et al., 2007, Flipo et al., 2007, Jégo et al., 2008). Ainsi, l'Ecole des Mines de Paris a développé un couplage entre le modèle agronomique Stics (Brisson et al., 1998) et MODCOU (Gomez et al., 2003).

L'application mise en place par Gomez et al. (2003) et Ledoux et al. (2007) exploite la base de données des pratiques culturales de Mignolet et al., (2007) , qui définit dans chaque Petite Région Agricole (PRA) et sur une période de 30 ans, les différentes rotations culturales et pratiques agricoles associées.

Cette modélisation a été utilisée pour évaluer la contamination des nappes par les nitrates actuelle et à venir sous différents scénarios climatiques ou agronomiques, en particulier, pour tester l'impact de l'introduction de cultures intermédiaires piège à nitrate (CIPAN, Viennot et al., 2009), et estimer l'impact socio-économique sur la production d'eau potable (Viavattène et al., 2006).

Cependant, la structure de ce couplage était relativement complexe du fait de la relative rigidité de MODCOU, et conduisait à plusieurs redondances de calcul (bilan hydrique et calcul des écoulements en nappe estimés 2 fois), et de fait, ne permettait pas d'interaction. Par ailleurs, les efforts menés pour paralléliser Stics, afin de le faire tourner sur près de 8000 parcelles, ont conduit à de nombreuses modifications du code et donc à des difficultés à intégrer les nouvelles versions de Stics.

Ainsi, nous faisons évoluer ce premier couplage dans le cadre du projet Eau-dyssée, en utilisant la nouvelle version de MODCOU et la dernière version du modèle Stics.

En effet, l'INRA a développé une version de Stics plus modulaire, codée en fortran90. Cependant, cette nouvelle version n'est pas spatialisée, et ne peut tourner que sur une parcelle. Cette problématique est abordée notamment par la plateforme [Record](#). Cependant, la structure choisie par Record ne permet pas de traiter un grand nombre de parcelles agricoles, et n'est donc pas adaptée aux applications visées. Ainsi, nous devons dans le couplage, intégrer la spatialisation de Stics en limitant les intrusions dans le code.

Nous sommes aidés pour cela par le coupleur Palm du Cerfacs, et par la modularisation de Stics qui nous permet de conserver toute une partie du code intacte, et de ne modifier que la partie amont.

Ces travaux de couplage sont menés en collaboration avec l'équipe Agroclim développant Stics, et le Cerfacs.

Ainsi, nous avons tout d'abord développé un couplage interactif en 1D, et préparons depuis une spatialisation de Stics.

3.1 Couplage interactif agro-hydrologique pour la gestion de l'irrigation

Une première application démonstrative de l'intérêt du couplage interactif agro-hydrologique a permis de simuler les rendements agricoles d'une culture irriguée dans un contexte de ressource en eau limitée. Pour cela, nous devons estimer les règles de décision qui vont conduire à décréter la limitation de l'irrigation. Nous avons choisi d'utiliser les niveaux piézométriques d'alerte (cf figure encapsulée en haut à droite de la Figure 9, et les débits d'alerte pour fixer les interdictions à l'irrigation. Ainsi, si ces niveaux ou ces débits sont dépassés, nous interdisons les prélèvements pour l'irrigation dans Stics.

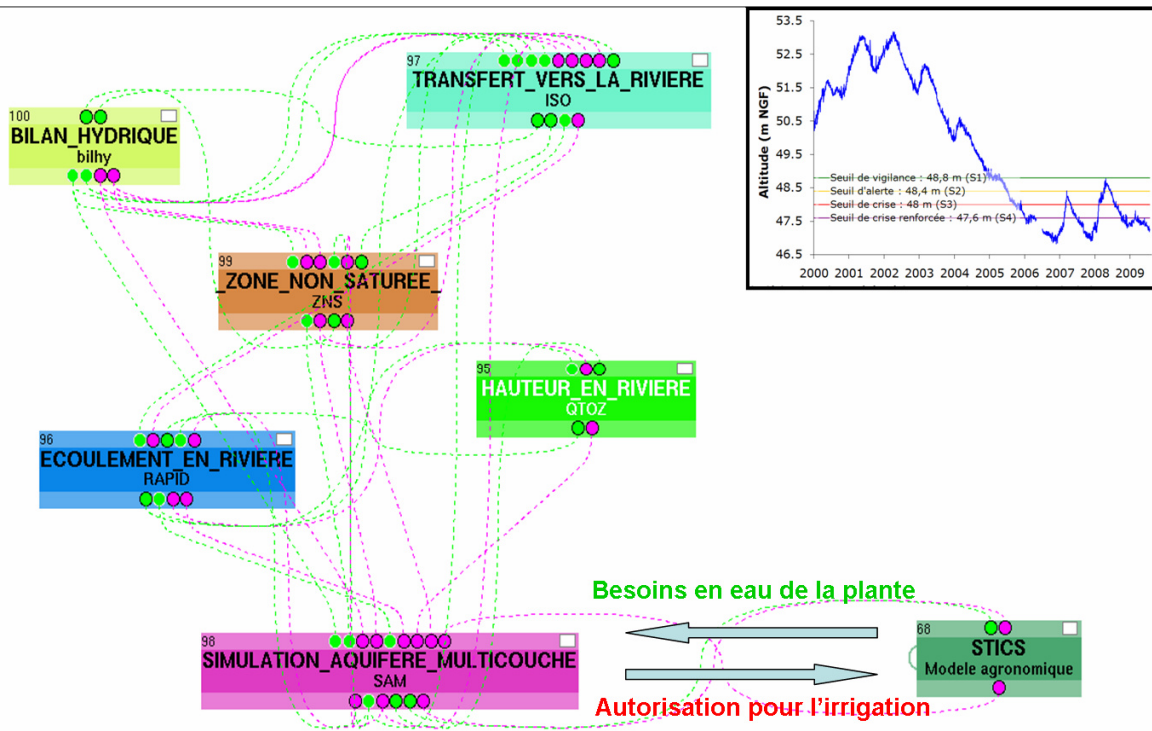


Figure 9 Illustration du couplage agro-hydrologique via le coupleur Palm tel que visualisé par PréPalm.

Les résultats de ce premier test sont illustrés figures 7 et 8, et ont fait l'objet d'une présentation au colloque CMWR (Habets et al., 2010).

Dans le cadre d'une modélisation distribuée, il faudra donc définir des zones d'influence entre les piézomètres et stations hydrométriques de référence, et les régions agricoles connectées pour l'irrigation. Mais, à ce jour, nous avons uniquement testé cette approche sur des parcelles de maïs de 10 hectares pompant dans le même puits. La Figure 9 présente le principe de ce couplage. Le modèle agricole Stics commence par estimer le besoin en irrigation de la plante pour un développement optimal de la culture. Ce volume d'eau est alors prélevé dans la nappe. Si le niveau piézométrique d'alerte est atteint, le modèle hydrologique envoie une interdiction d'irrigation au modèle agricole, qui se voit alors obligé de laisser la culture se développer sous stress hydrique.

On constate Figure 10 que sans irrigation, le niveau piézométrique qui au début de la simulation se situe au dessous du niveau d'alerte se retrouve au dessus de ce seuil sur toute la fin de la période simulée, ce qui indique une disponibilité de la ressource en eau. A l'inverse, si l'on irrigue sans se soucier de la ressource en eau disponible, le niveau piézométrique est constamment en dessous de ce niveau piézométrique d'alerte. L'interaction agro-hydrologique permet de maintenir le niveau piézométrique à un niveau relativement proche du niveau piézométrique d'alerte, avec des conséquences sur les rendements de maïs qui sont quand même supérieurs de 20% au cas sans irrigation (Figure 11).

On voit donc l'efficacité de ce couplage interactif pour optimiser l'adéquation entre ressource et rendement.

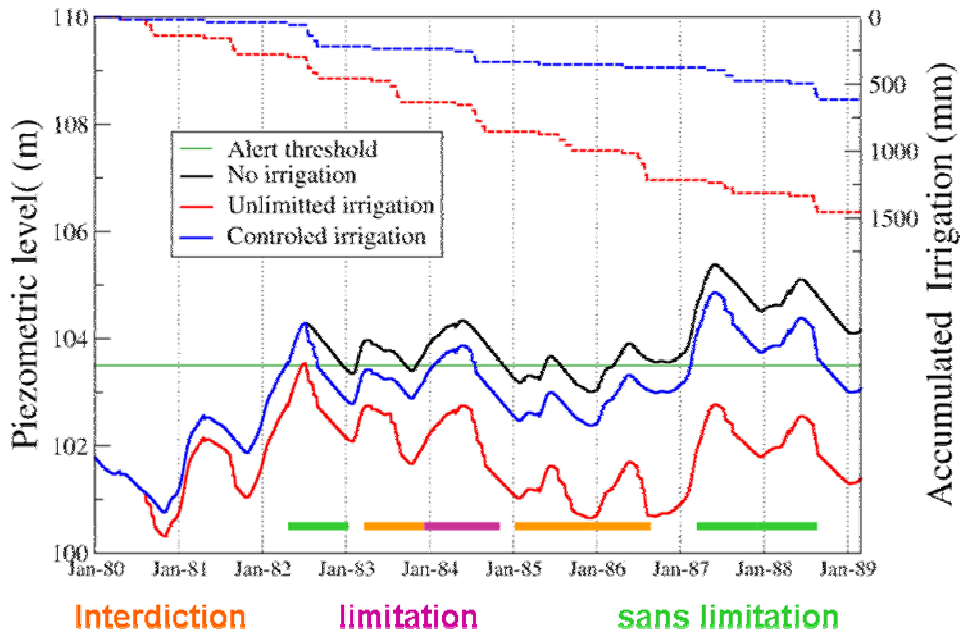


Figure 10 Les courbes du bas présentent le niveau piézométrique d'alerte fixé (ligne verte), les simulations du niveau piézométrique sans prélèvement pour l'irrigation (en noir), avec un prélèvement pour l'irrigation sans limite (en rouge) et avec prise en compte des limites liées à la disponibilité de la ressource en eau. Les courbes du haut représentent le cumul des prélèvements pour l'irrigation sur l'ensemble de la période (même code de couleur, légende à droite)

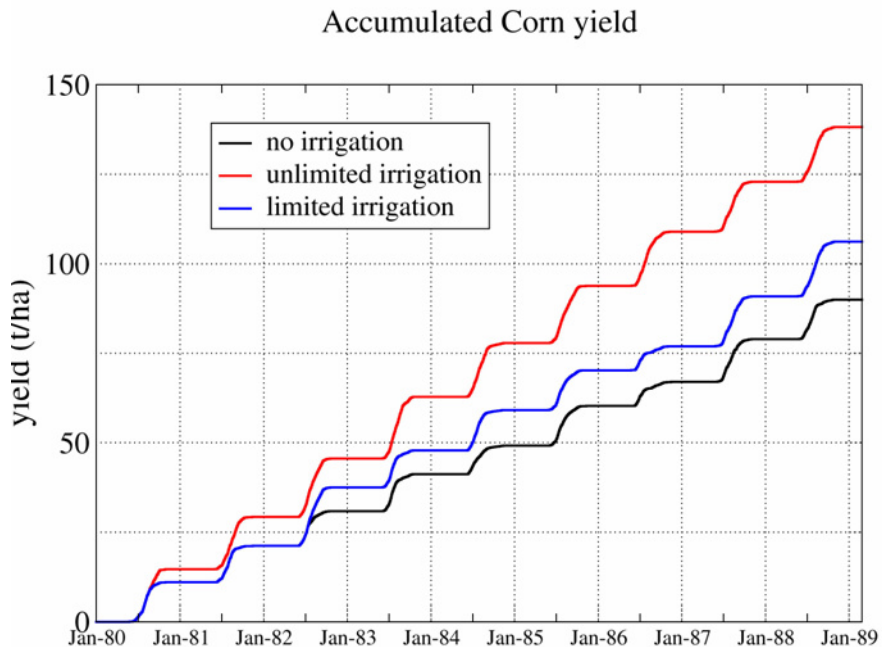


Figure 11 Impact de la limitation de l'irrigation sur la production agricole: cumuls des rendements de maïs en noir sans irrigation, en rouge avec irrigation sans limitation, en bleu avec une irrigation limitée en fonction de la ressource en eau.

Ces actions vont se poursuivre à l'échelle d'un bassin versant, et cela nécessite donc la spatialisation de Stics.

3.2 Principe de la spatialisation de Stics sur les bassins versants

Comme nous l'avons vu précédemment, l'application agro-hydrologique sur des grands bassins versants nécessite la "spatialisation" de Stics. La spatialisation de Stics pourrait être nettement facilitée par le développement au CERFACS d'un module de Palm (Palm Parasol) dédié au couplage entre modèles 2D et 1D et gérant de façon optimale la spatialisation (Figure 12). Le développement de ce module est prévu lors de la phase VI du PIREN Seine.

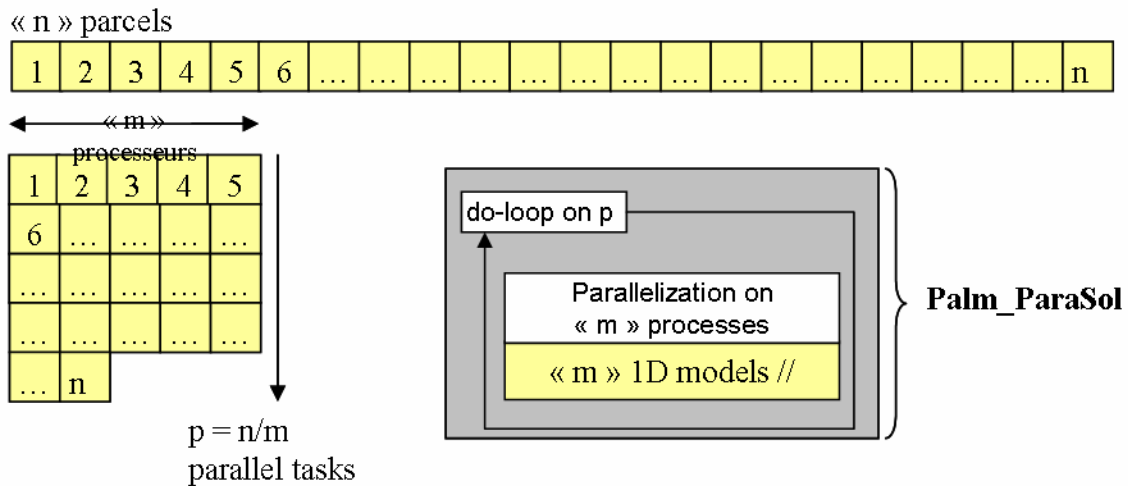


Figure 12 Principe d'une parallélisation de Stics proposée par Palm Parasol: approche par pool de processus: accélération des calculs d'un facteur m, m dépendant du nombre de processeurs disponibles sur la machine (figure préparée par Thierry Morel, Cerfacs)

En attendant le développement de Palm Parasol, nous mettons en place les éléments permettant le transfert des informations, en se basant sur une parallélisation très simplifiée de Stics, qui consiste à répartir chaque jour l'ensemble des parcelles Stics sur un nombre limité de processeurs.

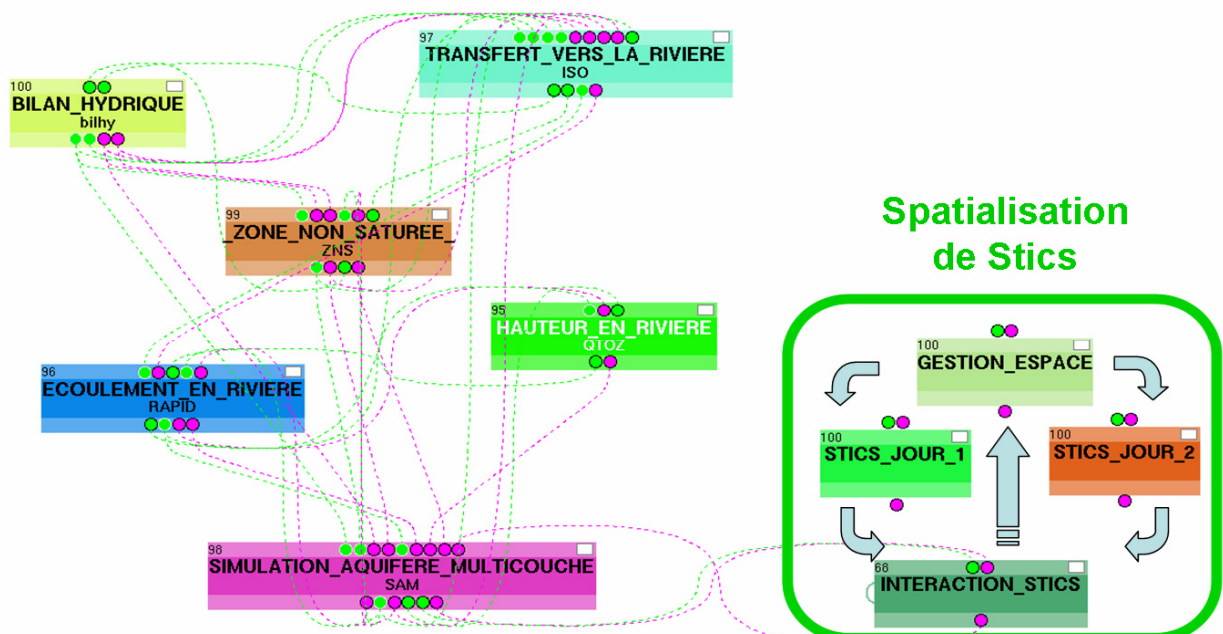


Figure 13 Illustration de la spatialisation de Stics en cours de mise en place dans Palm.

La Figure 13 illustre le principe de la méthode choisie : ainsi, l'ensemble des modules inclus dans la partie Stics-Jour, ie, tous les modules physiques, sont totalement inchangés. Seules les 3 ou 4 premières sous-routines de Stics, incluses dans le module 'gestion_espace' de la Figure 13 sont modifiées, via l'introduction d'une dimension pour chaque variable. Cette étape est simplifiée grâce à l'utilisation des structures dans Stics qui permet de stocker l'ensemble des informations nécessaires dans 5 structures principales. Chaque jour, le module 'gestion_espace' distribue les parcelles agricoles sur les modules 'stics_jours', et les variables mises à jour sont collectées par le module 'interaction_stics' qui va dialoguer avec le modèle hydrologique, d'une part pour transférer les flux d'eau et de polluant estimés par Stics sur les parcelles agricoles, et d'autre part pour interagir avec le module aquifère via les pompes pour l'irrigation. Ce travail a pu commencer grâce au soutien de l'ANR Vulnar qui a permis l'embauche de Wilfried Queyrel pendant plusieurs mois. La grande majorité des développements réalisés dans le cadre de cette 'spatialisation simplifiée' devrait pouvoir être utilisé directement dans Palm-Parasol.

Parmi les problèmes que posent l'application de ce couplage sur le bassin versant, l'adéquation des flux d'eau estimés par Stics pour simuler l'hydrologie du bassin versant devra être testée. Les précédentes versions de Stics avaient tendance à simuler un très faible flux de ruissellement (Gomez et al., 2003). Mais, ce défaut a semble t'il été corrigé dans la nouvelle version. Dans ce contexte, la modélisation agro-hydrologique possédera plusieurs modules pour l'estimation des bilans hydriques: Stics sur les cultures, et le module original de MODCOU pour les autres types d'occupation du sol.

Un autre problème est la prise en compte des rotations de cultures et itinéraires techniques dans Stics à l'échelle du bassin versant. Les bases de données développées par l'INRA SAD (Mignolet et al., 2007, Nicola et al., 2010) sont relativement complètes. L'information doit donc être 'digérée' afin d'être exploitée à l'échelle du bassin versant. C'est pourquoi nous proposons de travailler avec l'équipe AgroImpact de Laon à étudier la propagation des erreurs et des incertitudes résultants des approximations faites sur la modélisation agronomique à l'échelle d'un petit bassin versant, en se basant sur le site de Bruyères (Beaudoin et al., 2008), et d'étudier la propagation de ces erreurs lors d'un changement d'échelle. Ces travaux seront réalisés dans le cadre de la sixième phase du projet Piren-Seine, et devraient se concrétiser par une thèse.

3.3 Développement d'un module de transfert phytosanitaire dans Stics

La modélisation du transfert de produits phytosanitaires avec l'outil Stics-Modcou a déjà fait l'objet d'une étude (Rat et al., 2006) qui a conduit à l'introduction dans Stics de processus d'adsorption/désorption lente et rapide et de dégradation. Cependant, ces travaux avaient été menés dans une version "sacrifiée" de Stics, puisque seul le module sol avait été conservé. Par ailleurs, les réactions n'étaient prises en compte que dans la zone racinaire. Les autres transferts, en particulier dans la zone non saturée, étaient supposés non réactifs. Dans le cadre du PIREN-Seine, et en collaboration avec plusieurs équipes de l'INRA, un module dédié aux transferts des phytosanitaires va être implémenté dans Stics. Ces travaux seront menés dans le cadre de la thèse de Wilfried Queyrel qui a commencé en Octobre 2010, et qui va s'appuyer sur les mesures réalisées dans le cadre du projet Phyt'Oracle (Blanchoud et al., 2010) sur le bassin de l'Orgeval pour tester et évaluer la modélisation.

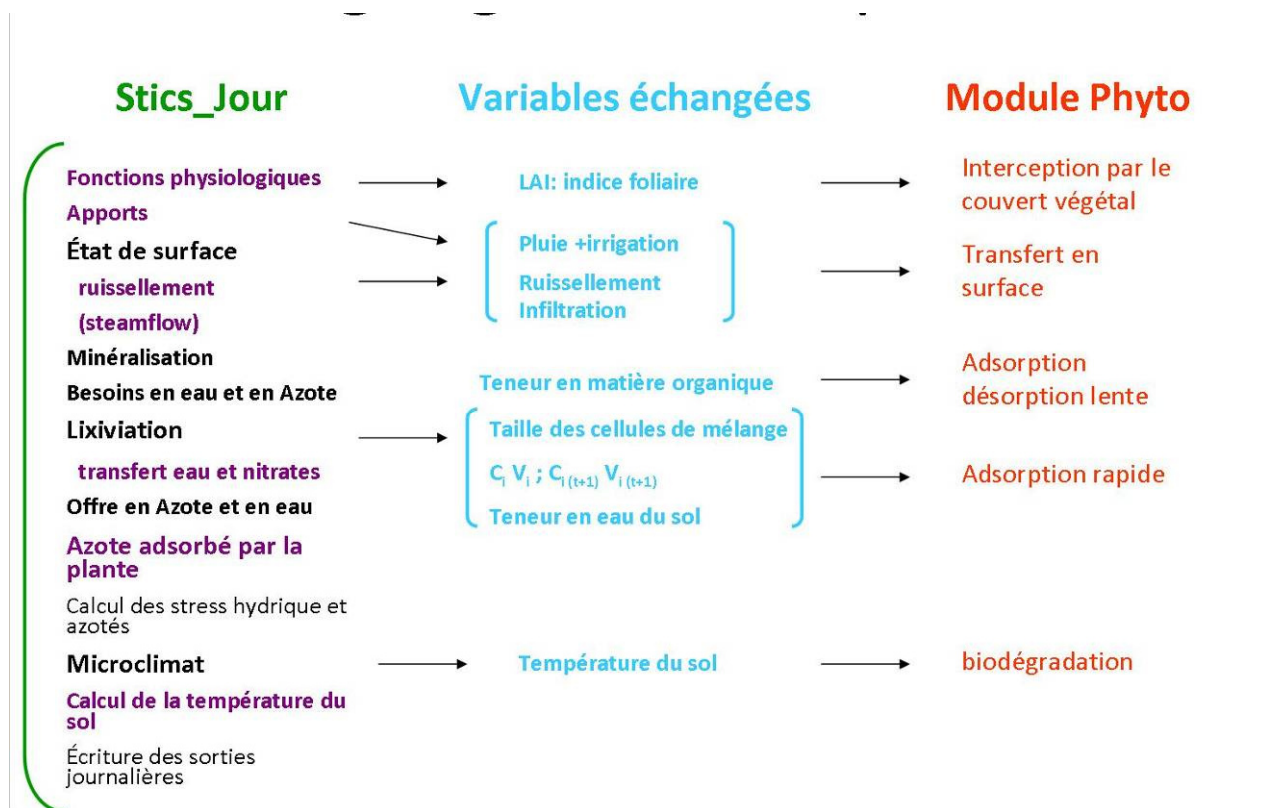


Figure 14 Principe du développement du module phytosanitaire dans Stics, et liens avec les variables simulées par Stic (source : Wilfried Queyrel)

4 Le lien avec l'agro-économie

L'objet du couplage agronomie-économie-hydrogéologie est l'étude des 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, 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 de pesticides, et donc, d'un risque accru de pollution diffuse par ces polluants. 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 peuvent être traités par le modèle agro-économique AROPAj-Stics (Godard et al. 2008), qui permet d'estimer les assolements et pratiques agricoles qui optimisent les bénéfices économiques d'exploitations agricoles 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 a pour but d'étudier les conséquences de ces comportements sur la pollution des nappes par les nitrates. 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. Dans ce rapport, on se contente de présenter le principe de fonctionnement de ces modèles et de leur dialogue, mais, les résultats obtenus sont décrits avec plus de détails dans le Rapport PIREN-Seine 2010 Agro-économie (Bourgeois et al., 2011).

4.1 Principe de fonctionnement du modèle agro-économique

D'un point de vue numérique, le modèle d'offre économique AROPAj est indirectement lié au modèle agronomique Stics (Godard et al., 2008). Pour chaque culture, le modèle Stics est utilisé pour calculer des «

fonctions de réponse » (Figure 15) décrivant l'évolution du rendement en fonction des intrants en nitrate. Pour chacune des cultures et chacune des exploitations agricoles types, on sélectionne une fonction de réponse parmi plusieurs réponses en fonction des types de sol, des dates de semis, etc.

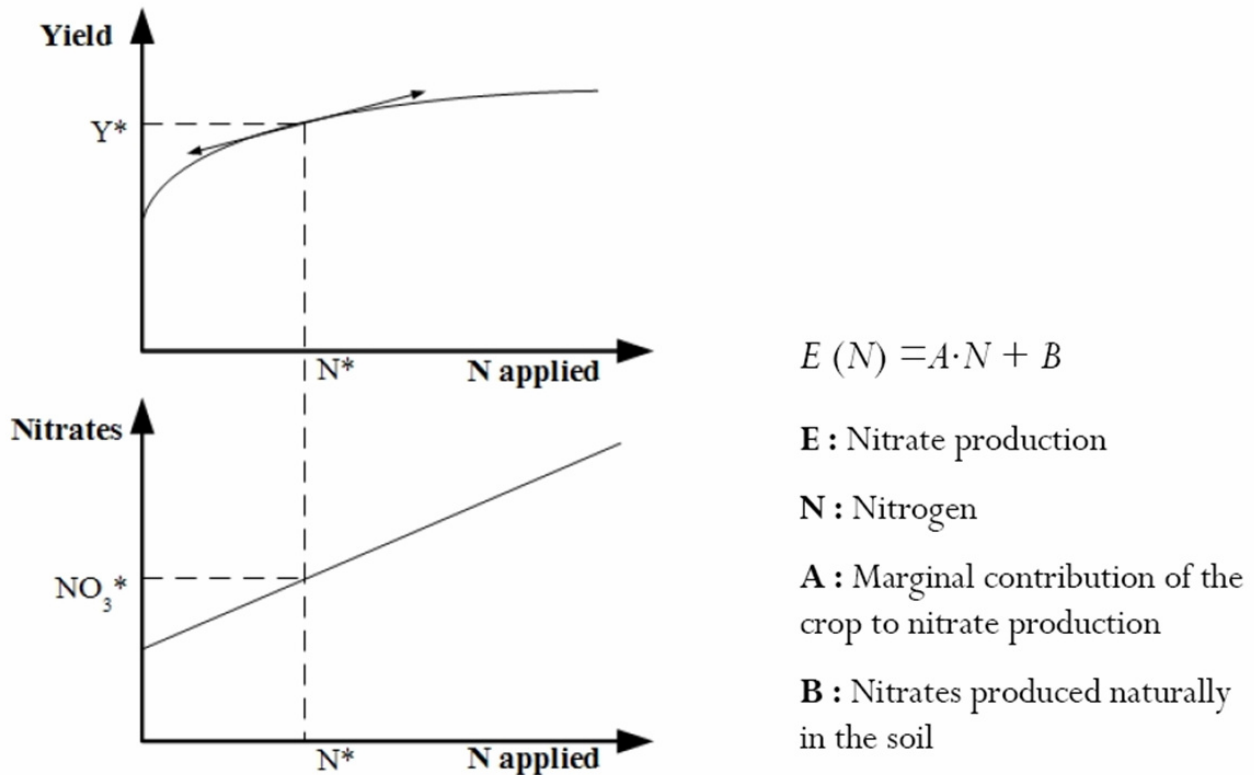


Figure 15 Fonction de réponse utilisée par AROPAj. La courbe du haut présente la relation entre le rendement et la dose d'azote utilisée (courbe obtenue d'après les simulations de Stics). AROPAj estime alors que le comportement optimal se situe là où la pente de la courbe est égale au rapport prix de l'azote/prix de vente de la culture. La dose d'azote ainsi estimée permet de déduire la quantité d'azote lixiviée (courbe du bas).

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. Cantelaube et al., (2008) ont mis en place une méthode statistique permettant de désagréger l'occupation des sols optimale estimée par AROPAj. Ainsi, la Figure 16 issue de Petsakos et Jayet (2010) montre par exemple l'impact d'une taxation du nitrate sur la lixiviation de l'azote sur le bassin de la Seine.

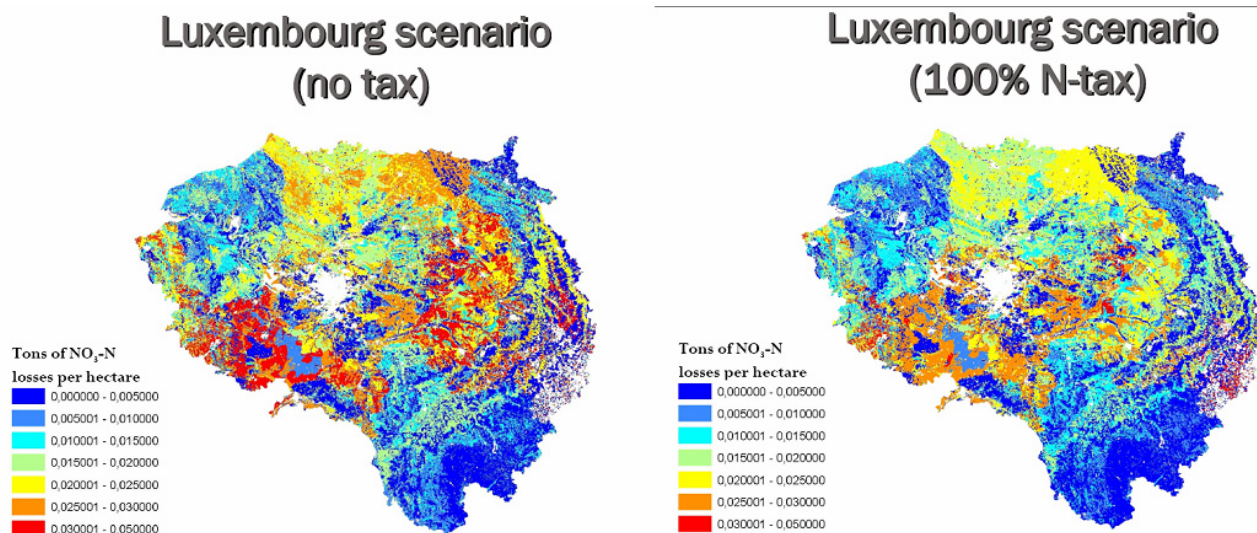


Figure 16 Quantités de nitrate lixiviées sur le bassin de la Seine dans le cadre de l'application du traité de Luxembourg à gauche sans taxe supplémentaire sur l'azote, et à droite, avec une taxe doublant le prix de l'azote. Figure issue de Petsakos et Jayet 2010.

4.2 Principe du dialogue entre les modèles agro-économique et hydrogéologique

Le modèle hydrogéologique MODCOU a besoin d'une estimation spatialisée des intrants en nitrate pour simuler la contamination des nappes par les nitrates. Aropaj-stics permet d'estimer les quantités de nitrates lixiviés au pas de temps annuel, en fonction des conditions météorologiques d'une année particulière. Ainsi, deux problèmes se posent :

- celui de la discrétisation spatiale qui a été en partie réglée par Cantelaube et al. (2008),
- et celui de la discrétisation temporelle. Il faut prendre en compte les variations inter-annuelles des flux lixiviés, ce qui est réalisé en prenant en compte des variabilités temporelles des variables économiques (une taxe sur l'azote pour le cas traité par Bourgeois et al., 2011).

Le dialogue réalisé entre ces deux modèles n'est donc pas interactif, et en particulier, il n'est actuellement pas possible de remettre en question la hauteur de la taxe en fonction de l'évolution de la qualité de l'eau. Nous espérons dans la phase VI avancer un peu plus sur ces questions, et également, prendre en compte la valeur économique de l'eau et des produits phytosanitaires.

5 Conclusion

Le développement d'un modèle intégré des hydrosystèmes qui a débuté lors de la phase V du PIREN a relativement bien avancé, avec un effort mené sous trois aspects :

- le développement d'une version plus modulaire de MODCOU doté de nouvelles capacités. Cette nouvelle version est maintenant passée sous le logiciel libre de gestion de version « subversion », qui permet de mieux gérer les développements réalisés dans le code. Par ailleurs, une documentation décrivant les entrées sorties a été rédigée (Habets, 2010).
- la prise en main de la nouvelle version du modèle agronomique STICS, et les développements d'un couplage interactif avec l'hydrologie, ainsi que le début du développement d'un module dédié au transfert des phytosanitaires.
- le dialogue avec le modèle d'offre agro-économique AROPAj.

Par ailleurs, des avancées ont été réalisées sur le couplage entre MODCOU et le schéma de surface SURFEX. Bien que ces travaux ne font pas partie directement du PIREN-Seine, il pourrait y avoir une convergence lors des prochaines phases, le couplage avec SURFEX permettant une estimation des bilans hydriques à partir de paramètres physiographiques prédéterminée (ne nécessitant donc pas une phase de

calibration).

L'ensemble de ces travaux vont se poursuivre lors de la phase VI. Un des principaux objectifs sera le développement du couplage Stics-phyto-MODCOU spatialisé à l'aide de Open-Palm Parasol, afin de permettre des applications sur les bassins et sous-bassins de la Seine. Un autre objectif est la prise en compte des processus réactifs lors du transfert des solutés. Cela nécessitera le développement de nouveaux modules, aussi bien au sein du modèle agronomique qu'hydrologique, et de s'assurer de la pertinence des flux quantitatifs et qualitatifs, en s'appuyant si besoin sur des méthodes évoluées comme la géostatistique. Enfin, on travaillera au développement de l'interaction entre l'économie et l'hydrosystème afin d'être capable d'aborder ou de développer de nouveaux scénarios socio-économique.

6 Références

- A. Bacchi, F. Habets, H. Blanchoud, E. Moreau-Guigon, E. Ledoux, and P. Viennot. Modélisation des transferts de pesticide dans la zone non-saturée. 21p, Piren-Seine, 2009. Rapport d'activité du PIREN-Seine 2008.
- N. Beaudoin, M. Launay, E. Sauboua, G. Ponsardin, and B. Mary. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyeres catchment. *European Journal of Agronomy*, 29(1) :46–57, 2008.
- V. Beaujouan, P. Durand, and L. Ruiz. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling*, 137(1) :93–105, 2001.
- M. Besbès and G. de Marsily. From infiltration to recharge : use of parametric transfer function. *J. of Hydrol.*, 74 :271–293, 1984.
- H. Blanchoud, V. Bergheaud, L. Nicola, G. Vilain, S. Bardet, G. Tallec, F. Botta, E. Barriuso, C. Schott, A. Laverman, F. Habets, P. Ansart, A. Desportes, and M. Chevreuil. Transfert de pesticides dans le système sol-nappe-rivière : Etude du Comportement de l'atrazine et de l'isoproturon dans le bassin versant de l'Orgeval. 18p, Piren Seine, 2010. Rapport d'activité du Piren-Seine 2009.
- C. Bourgeois, P-A Jayet, A. Petsakos, C. Schott, P. Viennot et F. Habets, 2011 Réguler l'activité agricole pour maîtriser la concentration de nitrate dans les nappes, Rapport PIREN Seine 2010
- S. Brouyere, A. Dassargues, and V. Hallet. Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium : a field investigation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 72(1-4) :135–164, 2004.
- N. Brisson, B. Mary, D. Ripoche, M. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. Machet, J. Meynard, and R. Delecolle. 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(5-6) :311–346, 1998.
- P. Cantelaube et al., Modélisation économique des relations entre agriculture et environnement à l'échelle du bassin de la Seine. 2008. Rapport d'activité du PIREN SEINE 2007.
- R. Carsel and R. Parrish. Developing joint probability-distributions of soil-water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24(5) :755–769, may 1988. ISSN 0043-1397.
- C. David, D. Maidment, G. Niu, Z. Yang, and F. Habets. Rapid applied to the SIM-France model. *Hydrol. Proces*, 2011. Submitted
- J. Dehotin. Prise en compte de l'hétérogénéité des surfaces continentales dans la modélisation hydrologique spatialisée. Application sur le haut bassin de la Saône. 330p, Cemagref, 2007. Thèse de l'Institut national Polytechnique de Grenoble, dirigée par Isabelle Braud.
- N. Flipo, S. Even, M. Poulin, S. Thery, and E. Ledoux. Modeling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Science of the total environment*, 375(1-3) :69–79, 2007.
- C. Godard, J. Roger-Estrade, P. A. Jayet, N. Brisson, and C. Le Bas. Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems*, 97(1-2) :68–82, 2008.
- P. Goblet. Transfer of solutes in waterbearing ground from experience in theory. *Annales des Mines*, 191(5-6) :75–84, 1984. ISSN 0003-4282.
- E. Gomez, E. Ledoux, P. Viennot, C. Mignolet, M. Benoit, C. Bornerand, C. Schott, B. Mary, G. Billen, A. Ducharme, and D. Brunstein. An integrated modelling tool for nitrates transport in a hydrological

- system : Application to the river Seine basin. *Houille blanche-revue internationale de l'eau*, 3 :38–45, 2003.
- F. Habets, O. Souhar, W. Queyrel, P. Viennot, N. Flipo, P. Goblet, E. Ledoux, D. Ripoché, M. Launay, P. Bernard, and T. Morel. Dynamic coupling of hydrogeologic and agronomic models in the framework of the Eau-dyssée integrated model. 2010a. Présentation à la conférence Computational Method in Water Resources, Barcelone, 2010.
- F. Habets, 2010 : Notice Utilisateurs Eau-dyssée, 45 pages
- G. Jégo, M. Martínez, I. Antigüedad, M. Launay, J. M. Sanchez-Pérez, and E. Justes. Evaluation of the impact of various agricultural practices on nitrate leaching under the root zone of potato and sugar beet using the stics soil-crop model. *Science of the Total Environment*, 394(2-3) :207–221, 2008.
- E. Ledoux, E. Gomez, J. M. Monget, C. Viavattene, P. Viennot, A. Ducharne, M. Benoit, C. Mignolet, C. Schott, and B. Mary. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of the total environment*, 375(1-3) :33–47, 2007.
- C. Mignolet, C. Schott, and M. Benoit. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin : Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of the Total Environment*, 375(1-3), 2007.
- L. Nicola and C. Schott. Etude des pratiques de désherbage du blé tendre dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2008. 67p, Piren-Seine, 2010. Rapport d'activité du PIREN-Seine 2009.
- A. Petsakos and P. Jayet. Evaluating the efficiency of an N-input tax under different policy scenarios at different scales. Technical report, 2010. 120 EAAE Seminar, External cost of farming activities : economic evaluation, Risk considerations, Environmental Repercussions and Regulatory Framework. Maich, Chania, Greece, 2-4 Sep 2010.
- D. Peyrard, S. Sauvage, P. Vervier, J. M. Sanchez-Perez, and M. Quintard. A coupled vertically integrated model to describe lateral exchanges between surface and subsurface in large alluvial floodplains with a fully penetrating river. *Hydrol. Proces*, 22(21) :4257–4273, 2008.
- A. Piacentini and PALM Grp. PALM : A dynamic parallel coupler. In Palma, JML and Dongarra, J and Hernandez, V and Sousa, AA, editor, high performance computing for computational science - vecpar 2002, volume 2565 of lecture notes in computer science, pages 479–492, 2003.
- A. Rat, E. Ledoux, and P. Viennot. Transferts de pesticides vers les eaux souterraines, modélisation à l'échelle d'un bassin versant : cas d'étude du bassin amont de la Vesle. (116p), 2006. Rapport d'activité 2005 du Programme PIREN-Seine.
- P. Ross. Modeling soil water and solute transport - Fast, simplified numerical solutions. *Agronomy journal*, 95(6) :1352–1361, 2003.
- F. Saleh. Apport de la modélisation hydraulique pour une meilleure simulation des tirants d'eau et des échanges nappe-rivière à l'échelle régionale. 2010. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie.
- F. Saleh, N. Flipo, F. Habets, A. Ducharne, L. Oudin, P. Viennot, and E. Ledoux. Impact of in-stream water level fluctuations on interactions between streams and aquifer units at the regional scale. *J. of Hydrol.*, sous presse, 2011. 10.1016/j.jhydrol.2011.02.001
- R. Therrien and E. Sudicky. Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 23(1-2) :1–44, 1996.
- D. Thiéry. Plaquette de présentation du code de calcul MARTHE du BRGM. Technical Report 18p, BRGM, 2004. URL www.brgm.fr/pdf/logiciels/Marthe.pdf. Note technique NT EAU 2004/21.
- M. T. van Genuchten. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44 :892–898, 1980.
- C. Viavattène. Exploitation socio-économique de la modélisation souterraine du transfert des nitrates à l'échelle du bassin de la Seine. Mines-Paristech, 2006. Thèse de l'Ecole des Mines de Paris.
- Viennot P, Ledoux E., Monget J.M., Schott C., Garnier C., Beaudoin N., (2009), La pollution du bassin de la Seine par les nitrates, plaquette AESN, ISBN : 978-2-9-918251-02-6