

Vers une modélisation à base physique de la dénitrification dans la zone hyporhéique de Droupt Saint Basle

Florence Curie¹, Agnès Ducharne², Christelle Courbet² et Hocine Bendjoudi²

¹ UMR Sisyphe, Jussieu, Florence.curie@upmc.fr

² UMR Sisyphe, Jussieu

1 Introduction et objectifs

Nous avons réalisé un suivi hydrologique et géochimique d'une zone riveraine située dans le bassin versant de la Seine à une cinquantaine de kilomètres de la ville de Troyes. La première partie de ce rapport est consacrée à l'étude des résultats obtenus lors de ce suivi, ainsi qu'à la présentation du fonctionnement hydrologique et géochimique du site d'étude (Curie et al., 2008). La seconde partie correspond à la modélisation qui a été entreprise à partir des informations collectées sur le terrain et qui va nous permettre de conforter les hypothèses de fonctionnement déduites du terrain.

Notre objectif lors de cette étude est de comprendre les facteurs influençant la dénitrification à l'échelle du site d'étude et d'essayer de quantifier la perte en nitrates par cette voie. A terme, la modélisation entreprise devrait permettre de tester des scénarios de gestion et de déterminer l'impact de différents changements (notamment hydrologiques) sur les capacités de dénitrification de la zone.

2 Etude de la dénitrification à l'échelle d'une zone riveraine

2.1 Présentation de la zone d'étude

Notre zone d'étude se situe à Droupt Saint Basle dans le bassin versant de la Seine à l'amont de la confluence entre l'aube et la Seine sur le ruisseau de Beauregard. Ce ruisseau est un ancien bras de la Seine dont le trajet est parallèle à la Seine. Il est soutenu tout au long de l'année par le barrage réservoir du lac d'Orient situé à l'amont de notre zone d'étude. Le Beauregard rejoint ensuite la Seine à l'aval de notre site (**Figure 1**). L'instrumentation de la zone d'étude est constituée de 4 piézomètres (W1, W2, W3, W4) situés le long d'un transect allant des côteaux crayeux au ruisseau de Beauregard. Les piézomètres sont distants d'environ 150 m les uns des autres (**Figure 1**). Cette instrumentation a été complétée à la fin de la période d'étude par la mise en place de dix tubes (P1 à P10 **Figure 3**)

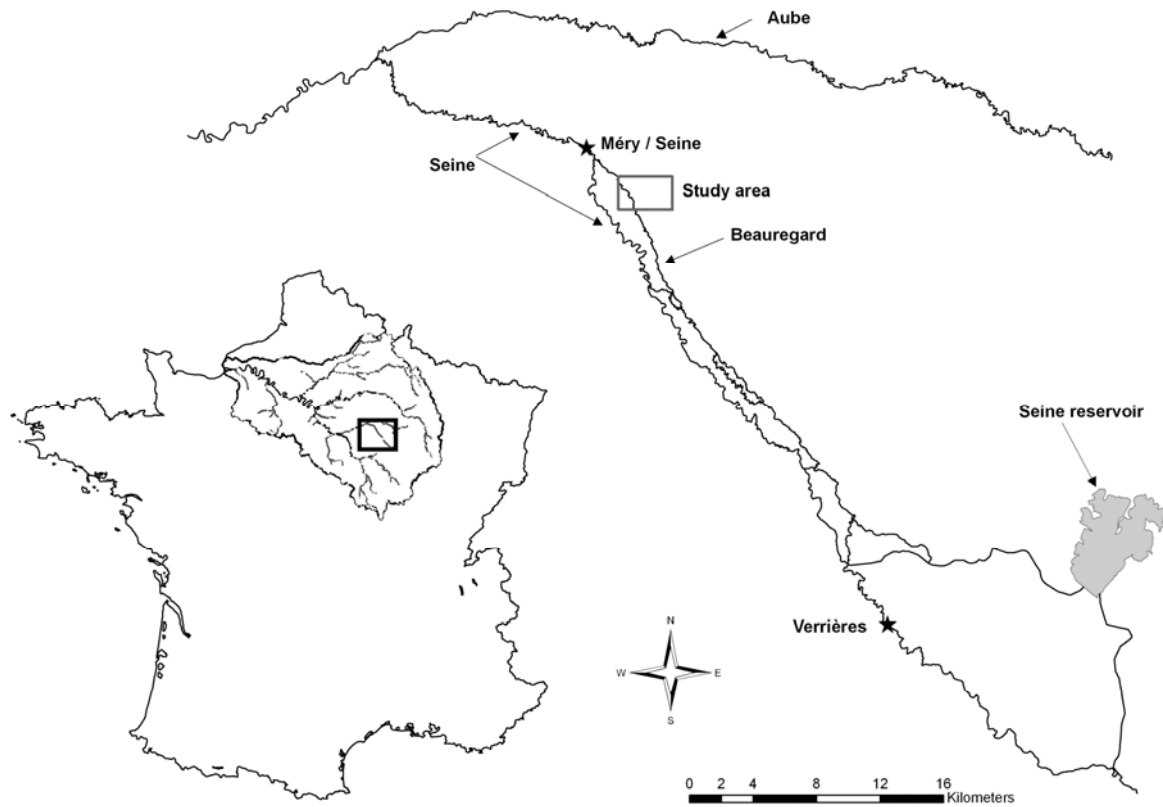


Figure 1 : carte du réseau hydrographique dans la zone de Droupt Saint Basle.

Le piézomètre W1 (le plus éloigné du ruisseau) est entièrement dans la craie. L'épaisseur des alluvions augmente progressivement du piézomètre W2 au Beauregard pour atteindre une profondeur d'environ 6 m au piézomètre W4 (**Figure 2**). D'avril 2004 à août 2005, des mesures et des prélèvements ont été effectués dans le Beauregard ainsi qu'à différentes profondeurs sur les 4 piézomètres et dans les tubes.

Les mesures du pH, du potentiel redox, de la température de l'eau, de la conductivité et de l'oxygène dissous sont effectuées in situ. Les analyses des cations et anions majeurs ainsi que de l'alcalinité sont réalisées en laboratoire (par chromatographie ionique), sur les prélèvements d'eau.

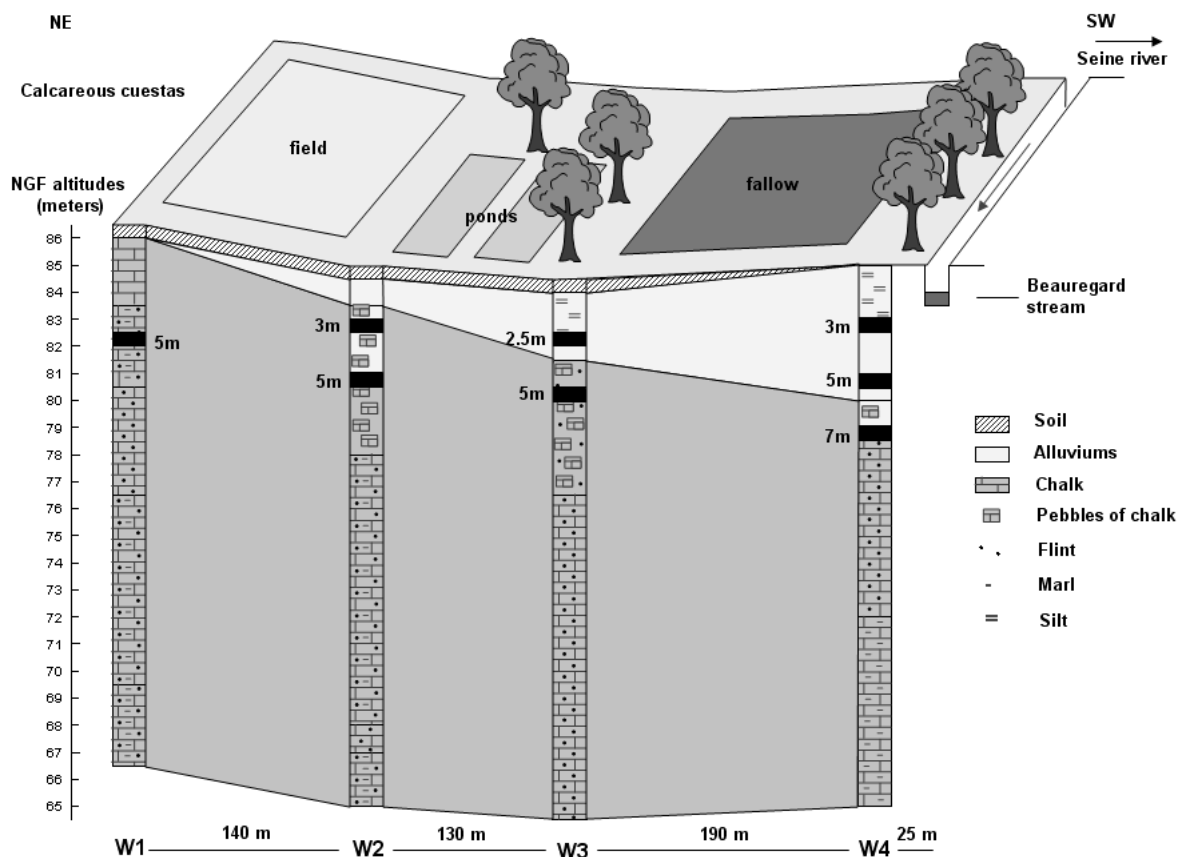


Figure 2 : Occupation du sol et géologie du site d'étude

2.2 Fonctionnement hydrologique

Les mesures des niveaux d'eau dans les tubes, les piézomètres et en rivière ont permis de tracer des cartes piézométriques pour la période printemps/été 2005. Durant cette période, les niveaux d'eau en rivière se trouvent approximativement un mètre au dessus de ceux de la nappe alluviale. Ce fort gradient existant entre la rivière et la nappe est lié à l'alimentation tout au long de l'année du ruisseau de Beauregard par le barrage de la Seine situé en amont. Les cartes réalisées mettent en évidence une zone de drain vers laquelle converge les eaux en provenance de la rivière et celles en provenance des coteaux crayeux (**Figure 3**). Cette zone de drain correspond à une zone de résistivité plus élevée sur le profil électrique réalisé entre les piézomètre W3 et W4 (**Figure 4**).

L'ion chlorure (Cl⁻) est un élément dit « conservatif » parce qu'il n'intervient pas dans les cycles biogéochimiques et qu'une fois en solution, peu de réactions permettent de l'extraire. Il peut donc être considéré comme un traceur naturel des eaux souterraines. Dans le cadre de cette étude nous nous en sommes servis pour vérifier le fonctionnement hyporhéique mis en évidence par la piézométrie. La concentration en chlorure semble augmenter du piézomètre W1 au piézomètre W3, ce qui probablement lié à l'utilisation d'engrais chlorés dans le champ situé entre W1 et W2 (**Figure 5a**). La rivière, quant à elle, présente des valeurs plus faibles que dans les piézomètres. Les concentrations en W4 sont intermédiaires entre celles observées en W3 et celles observées dans la rivière, ce qui est indicatif d'un mélange en W4 des eaux issues du coteau avec celles de la rivière.

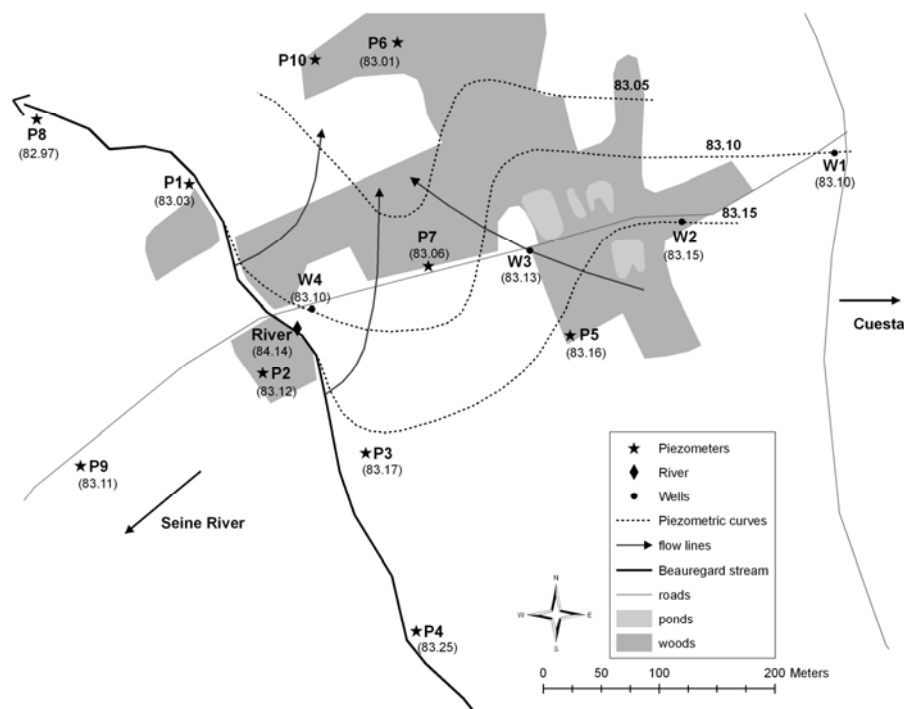


Figure 3 : Carte piézométrique du 15/06/2005

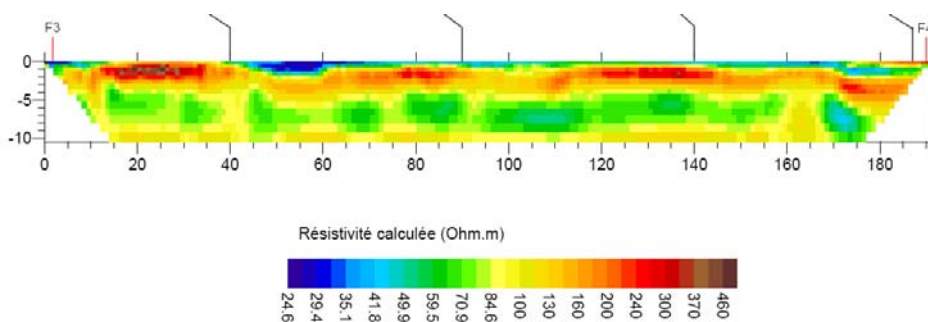


Figure 4 : Profil de résistivité réalisé entre les piézomètres F3 et F4.

2.3 Fonctionnement géochimique

En période hivernale, les nitrates présentent la même évolution que les chlorures et montrent des concentrations en F4 intermédiaires à celles mesurées en rivière et à celle mesurées en F3 ce qui indique un mélange entre les eaux provenant des côteaux crayeux et celles provenant de la rivière (**Figure 5b**). En été, les concentrations moyennes en nitrates à 3 m de profondeur sont plus faibles que celles mesurées en rivière. Cette baisse des teneurs en nitrates ne peut donc pas être seulement liée au phénomène d'alimentation du piézomètre F4 par la rivière moins chargée en nitrates. L'intervention d'un autre processus permettant d'éliminer les nitrates, la dénitrification, est nécessaire pour provoquer la baisse des concentrations en nitrates en dessous du niveau de celles de la rivière.

Ces faibles teneurs en nitrates sont accompagnées de faibles taux d'oxygène dissous (**Figure 5c**) et d'une baisse des taux de COD qui semble consommé durant cette période. Les conditions nécessaires à la dénitrification sont donc parfaitement remplies dans la zone riveraine (présence de nitrates, faibles teneurs en oxygène dissous et présence de carbone organique). Dans le piézomètre F4, en particulier à 3m de profondeur, le processus de dénitrification est marqué par une baisse des potentiels redox (**Figure 5d**) et une augmentation de la composition isotopique en ^{15}N des nitrates.

La dénitrification est localisée aux abords extrêmes de la rivière et n'a lieu qu'en période estivale. L'humidité étant constante tout au long de l'année, la température apparaît donc comme un facteur de contrôle de premier ordre de la dénitrification (Curie, 2006).

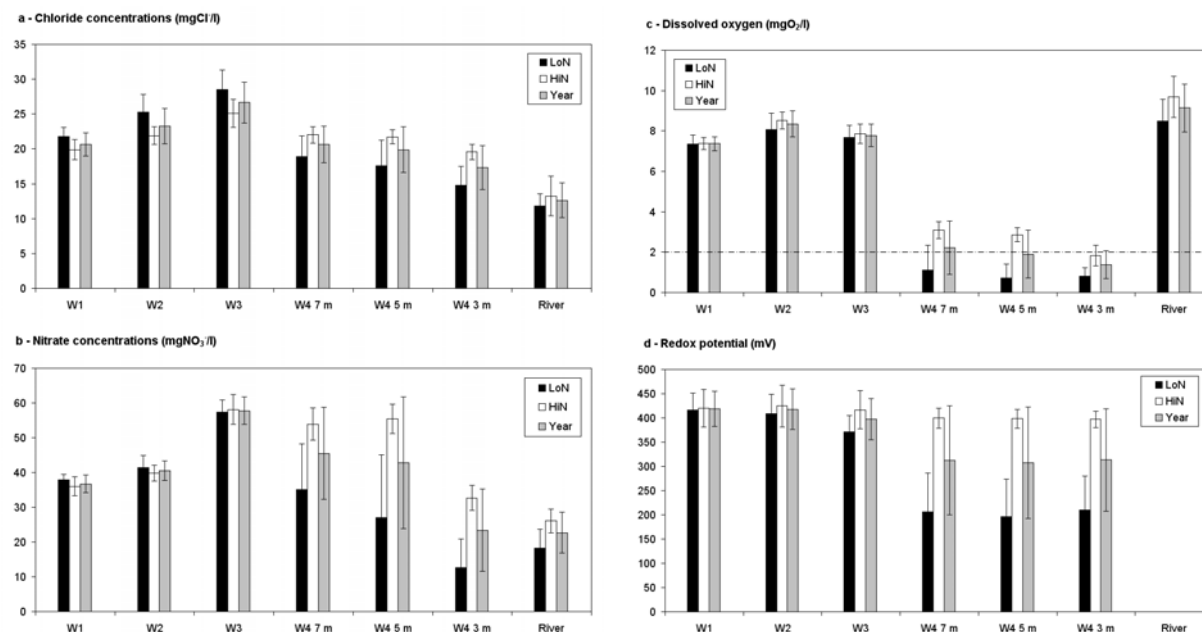


Figure 5 : Moyennes des concentrations en chlorures (a), des concentrations en nitrates (b), des taux en oxygène dissous (c) et des potentiels redox (d) pour la période estivale (en noir), la période hivernale (en blanc) et l'année (en gris) .

3 Modélisation hydrologique et géochimique de la zone riveraine de Droupt Saint Basle

3.1 Architecture du modèle

Pour réaliser cette modélisation, nous avons choisi d'utiliser le modèle hydrologique MODFLOW 2000 (Harbaugh et al., 2000), qui permet d'étudier le mouvement tridimensionnel des eaux souterraines dans un milieu poreux (**Figure 6**). Le transport réactif multi-espèces est réalisé, quant à lui, par le modèle PHT3D (Prommer et Barry, 2001) résultant de l'incorporation du modèle géochimique PHREEQC-2 (Parkhurst et Appelo, 1999) au modèle de transport advectif-dispersif MT3DMS (Zheng et Wang, 1999). Notre choix s'est porté sur le modèle PHT3D car il permet d'inclure de nouvelles réactions à celles déjà programmées dans la base de données et dont les taux peuvent être définis en fonction d'autres espèces.

Le pré et post-processeur PMWIN Pro (Processing Modflow Pro for Window) (Chiang et Kinzelbach, 2001) permet de formater facilement les données d'entrée nécessaires au modèle MODFLOW (géométrie, perméabilité...) et au modèle PHT3D (advection, dispersion et concentration) et de visualiser les sorties de la modélisation (charges et concentrations).

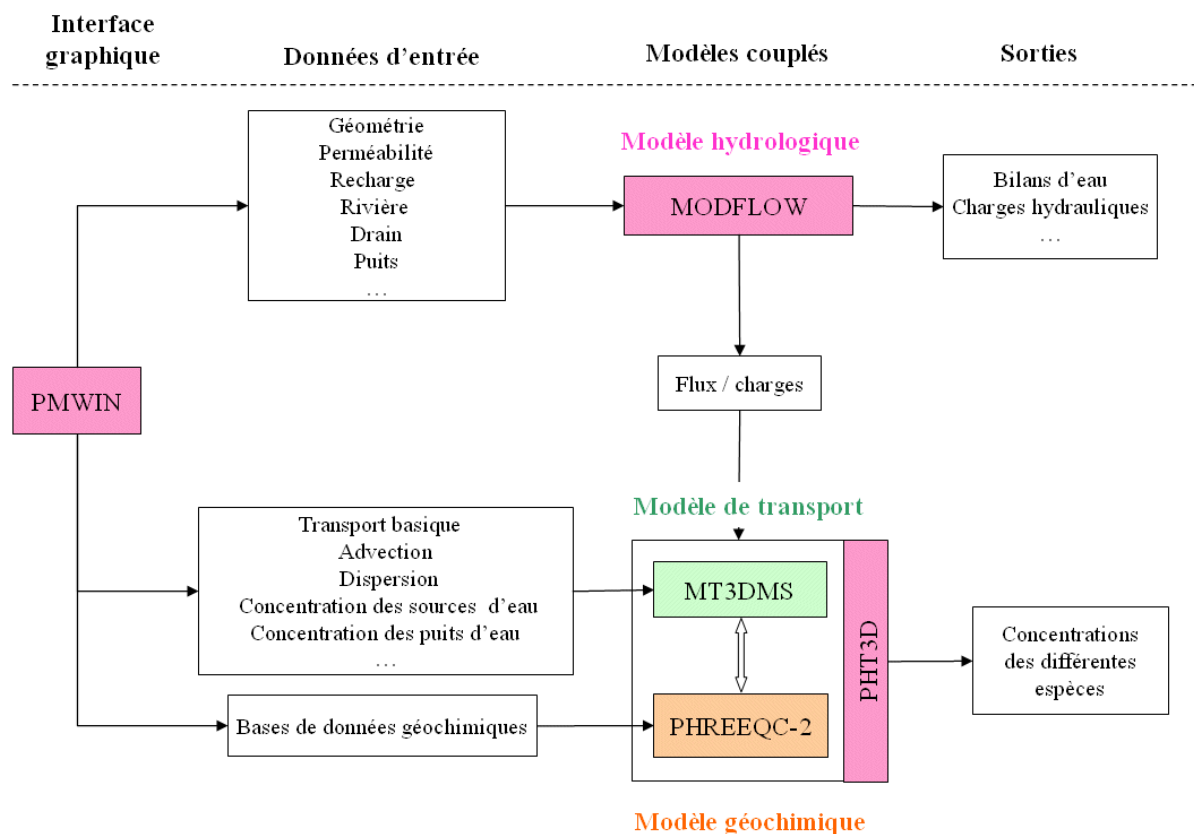


Figure 6 : Architecture du modèle couplé MODFLOW/PHT3D

3.2 Géométrie du modèle et conditions aux limites

Le domaine d'étude (environ 500m x 500m) a été discrétisé en mailles carrées de 10 x 10 m (Figure 7). Afin de nous rapprocher le plus possible de la géométrie réelle du terrain, nous avons défini 3 couches : une couche d'alluvions limoneuses en surface, une couche d'alluvions et une couche d'alluvions avec galets de craie en profondeur. La craie n'a pas été représentée explicitement dans cette modélisation. Cependant l'alimentation des alluvions par la craie a été prise en compte grâce à des puits injectant dans la couche la plus profonde une hauteur d'eau annuelle de 496 mm /an. Cette valeur ainsi que celle de la recharge sont extraites des travaux réalisés par Philippe Weng sur une zone alluviale se trouvant à quelques kilomètres de notre zone d'étude (Weng, 2000).

Nous avons défini les limites amont et aval de la zone riveraine comme des limites à charge imposée. La rivière à quant à elle été représentée à l'aide du module rivière de MODFLOW. Ce module calcule le flux entre la rivière et la nappe à partir des gradients de charges entre la rivière et la nappe et de la conductance du lit de la rivière. Nous avons choisi d'utiliser le module rivière plutôt qu'une limite à charge imposée pour définir le Beauregard car celui-ci ne semble pas être en parfaite connexion avec la nappe alluviale. L'étude de terrain a permis de mettre en évidence que la rivière se situe environ un mètre au-dessus de la nappe ce qui n'est possible que dans le cas où le fond et les berges de la rivière sont fortement colmatés.

Enfin, la zone de drain mise en évidence grâce à la piézométrie et dont l'existence a été confirmée lors de la réalisation d'un panneau électrique a été intégrée comme une zone à très forte perméabilité.

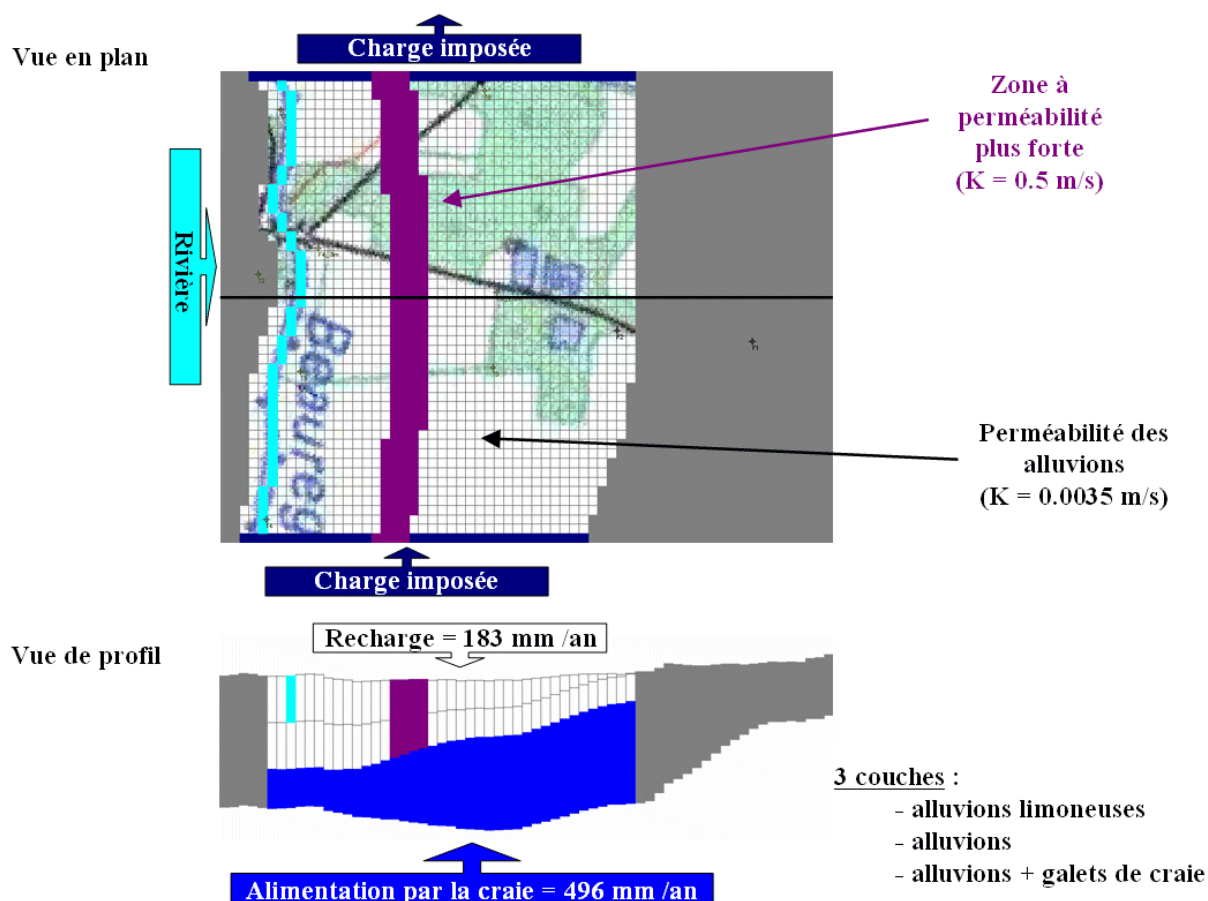


Figure 7 : Géométrie et conditions aux limites du modèle hydrologique.

3.3 L'hydraulique en régime permanent

La modélisation effectuée en régime permanent avec les forçages correspondant à la date du 15/06/2005 reproduit très correctement les courbes piézométriques obtenues à partir des mesures des niveaux piézométriques (Figure 8). Les tests effectués sur cette modélisation font apparaître que la présence d'une zone avec une perméabilité plus forte est indispensable à l'obtention d'une zone de drain vers laquelle convergent les eaux de la rivière et celles en provenance des côteaux crayeux.

L'erreur maximum entre charges observées et charges calculées est de 3 cm ce qui correspond approximativement aux erreurs cumulées sur le nivellement et sur les mesures des côtes piézométriques (Figure 9). L'erreur sur le bilan d'eau quant à lui est relativement faible, d'environ 1,5%.

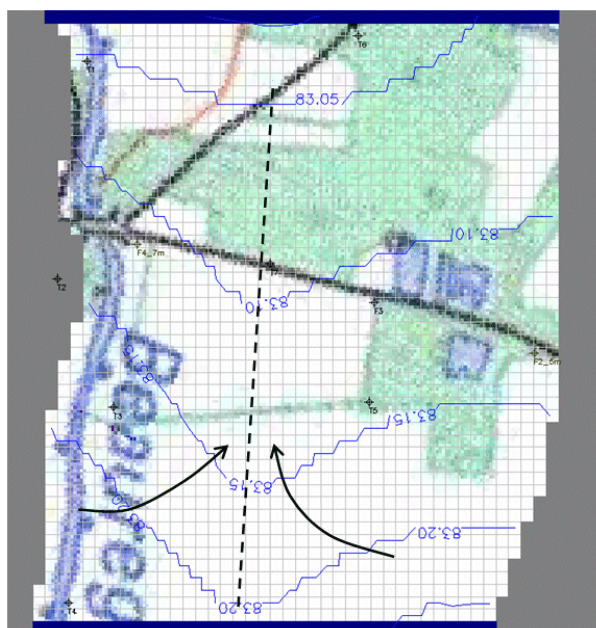


Figure 8 : Carte piézométrique modélisée en régime permanent à la date du 15/06/2005.

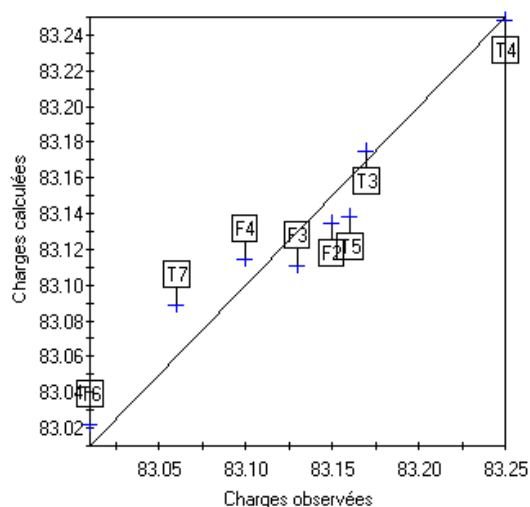


Figure 9 : Comparaison des charges observées et modélisée à la date du 15/06/2005.

3.4 Modélisation des chlorures

Les concentrations en chlorures en rivière et dans les piézomètres montrent très peu de variations en fonction du temps. Nous avons donc utilisé cet élément pour réaliser du transport en régime permanent sur l'hydraulique précédemment calé en régime permanent. Lors de cette modélisation, nous avons considéré que les concentrations mesurées en F3 étaient représentatives des concentrations en provenance de la craie. Nous avons alors injecté en rivière et dans la craie les concentrations moyennes annuelles mesurées respectivement en rivière et en F3. L'évolution des concentrations dans le piézomètre F4 à 3, 5 et 7 mètres de profondeur montre que les concentrations se stabilisent à des concentrations moyennes comprises entre celles mesurées en rivière et celles mesurées en F3 correspondant aux concentrations moyennes annuelles mesurées en F4 à 3, 5 et 7 mètres de profondeur (**Figure 10**).

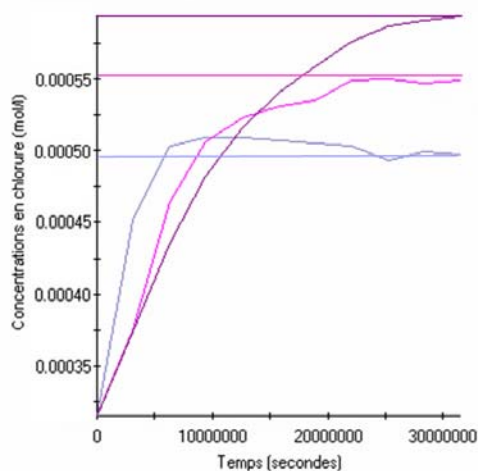


Figure 10 : Evolution des concentrations en chlorures en F4 aux trois profondeurs de mesures en régime permanent.

3.5 Modélisation de la température

A la différence des concentrations en chlorures, la température subit d'importantes variations saisonnières notamment en rivière et pour les prélèvements réalisés à faible profondeur (**Figure 11**). Afin de modéliser l'évolution de la température, nous avons donc choisi de réaliser sur l'hydraulique calée en régime permanent du transport en régime transitoire.

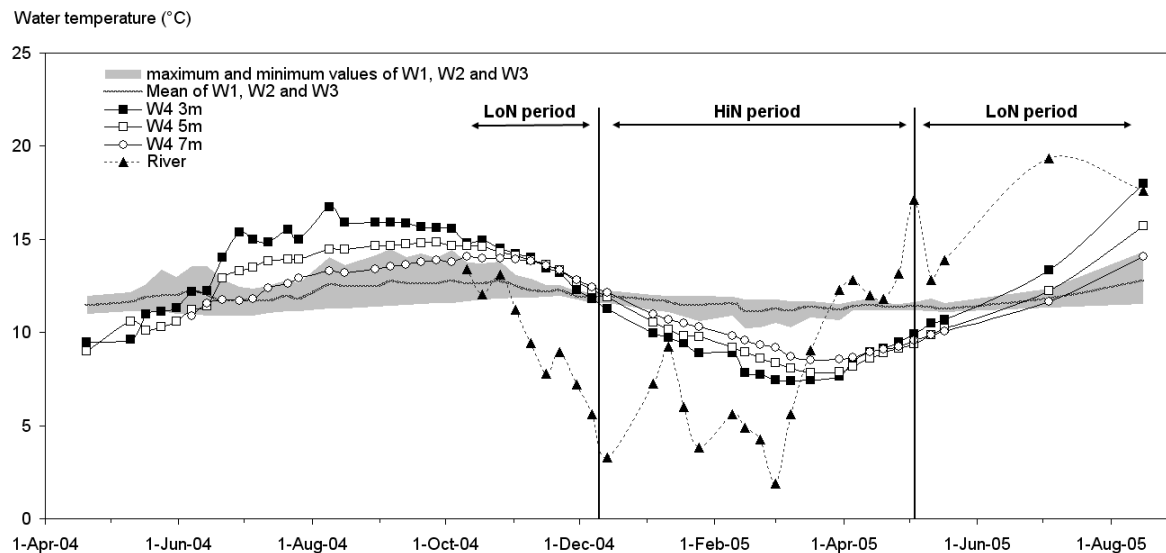


Figure 11 : Evolution des températures mesurées dans les piézomètres et dans la rivière durant la période de mesure.

Lors de cette modélisation, nous avons considéré que la craie alimentant le système à la base des alluvions présentait une température constante tout au long de l'année comme c'est le cas dans les piézomètres W1, W2 et W3 à 5m de profondeur (**Figure 11**). Nous avons défini, pour réaliser le forçage en rivière, 31 périodes de temps correspondant chacune à l'intervalle de temps séparant deux mesures sur le terrain. Au début de chaque période nous avons injecté en rivière la température mesurée. Les résultats obtenus montrent une bonne adéquation entre les températures mesurées et les températures modélisées une fois la période de calage passée (**Figure 12**). Le léger décalage observé lors de la remontée des températures peut être du soit à un mauvais paramétrage de l'advection, de la dispersivité et/ou de la sorption soit à l'absence de modification des gradients hydrauliques. En effet, lors de cette modélisation nous n'avons pas considéré que les gradients de charges entre la rivière et la nappe s'accroissent en été (**Figure 13**) et donc que l'alimentation de la nappe par la rivière était probablement de plus en plus importante. Cette alimentation plus importante en été par la rivière pourrait être à l'origine des températures plus fortes observées en période estivale en F4 à 3m de profondeur.

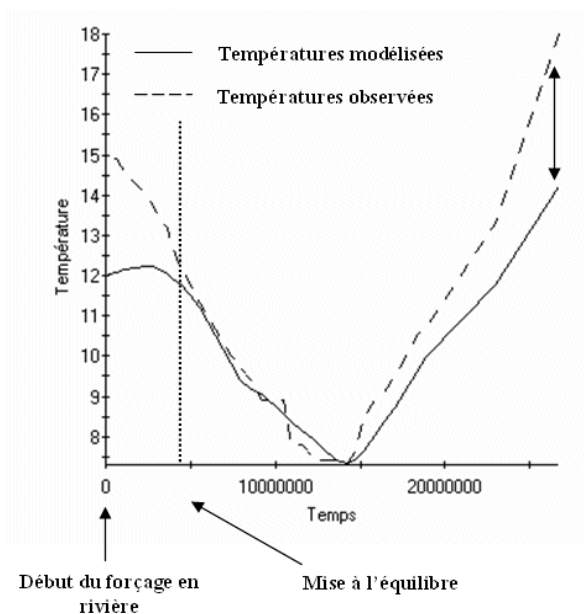


Figure 12 : Evolution des températures en F4 à 3 m en régime de transport transitoire.

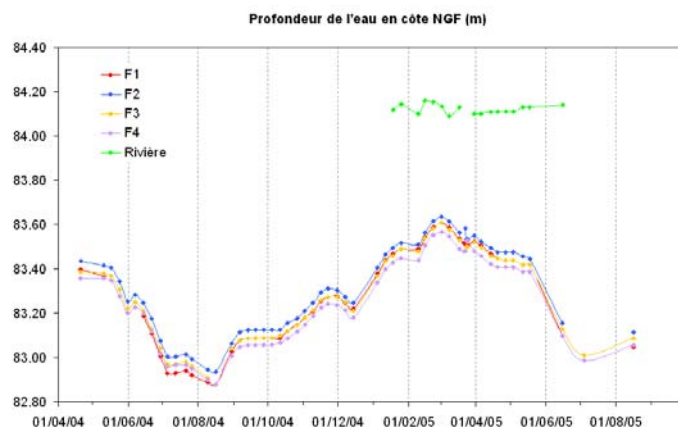


Figure 13 : Evolution de la charge hydraulique dans les 4 piézomètres (F1 à F4) et dans la rivière.

4 Conclusions et perspectives

L'étape suivante consiste à simuler les concentrations en nitrates. Dans un premier temps, nous vérifierons en transport passif que les concentrations en nitrates sont surestimées par le modèle et cela en particulier durant la période estivale. Cette étape devrait nous permettre de réaliser une première quantification de la perte en nitrates par dénitrification en comparant les résultats modélisés et les valeurs observées. Dans un second temps, nous tenterons de paramétrer le processus de dénitrification. Les résultats de terrain nous permettent de mettre en évidence un fort signal saisonnier qui ne peut pas être du à la variation de l'humidité puisque celle-ci reste constante au cours de l'année. La température apparaît donc comme un facteur de contrôle de premier ordre de la dénitrification. Dans un premier temps, on fera l'hypothèse que la réaction de dénitrification suit une cinétique d'ordre 1 avec une dépendance à la température. Différentes équations fréquemment utilisées pour paramétrer la dénitrification seront alors tester sur notre zone d'étude (loi de Van't Hoff, loi d'Arrhenius...). Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, d'autres paramètres (oxygène dissous, COD) seront intégrés afin de modéliser au mieux les observations de terrain.

L'objectif final de cette modélisation est de pouvoir tester l'impact de différentes modifications sur la dénitrification : baisse ou introduction d'une saisonnalité dans les hauteurs d'eau de la rivière (arrêt de la régulation par les ouvrages hydrauliques), baisse ou remontée des hauteurs d'eau dans la nappe (année humide / année sèche)...

Références :

- Chiang, W.-H. et Kinzelbach, W.** 2001. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN – A simulation system for modeling groundwater flow and pollution*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Curie, F.** 2006. *Rétention de nitrates dans les zones humides riveraines : rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelle dans le Bassin de la Seine*. Université Paris 6, 200 pp.
- Curie, F., Ducharne, A., Sebilou, M. et Bendjoudi, H.** 2008. Denitrification in a hyporheic riparian zone controlled by river regulation. *Hydrological processes*.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. et McDonald, M. G.** 2000. *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model — User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey.
- Parkhurst, D. L. et Appelo, C. A. J.** 1999. *User's guide to PHREEQC – A computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations*. US Geol. Survey Water-Resources Investigations.
- Prommer, H. et Barry, D. A.** 2001. *PHT3D – A reactive multi-component transport model for saturated porous media. Version 1.0 User's Manual*. Contaminated Land Assessment and Remediation Research Centre, The University of Edinburgh.
- Weng, P.** 2000. *Fonctionnement hydrologique d'une zone humide alluviale, relations avec l'aquifère sous-jacent et les rivières. Exemple de la Seine moyenne*. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 202 pp.
- Zheng, C. et Wang, P. P.** 1999. *MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.