

COUPLAGE DES MODELES NUMERIQUES SWAT ET FEFLOW POUR L'ETUDE DES FLUX DE NITRATE A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT AGRICOLE POSE SUR UN AQUIFERE SABLEUX. CALIBRAGE, VALIDATION ET TEST DE SCENARIOS POUR L'EVALUATION DE PRATIQUES AGRICOLES PLUS DURABLES EN TERME DE GESTION DE L'AZOTE

VANDENBERGHE CH. (1*), DENEUFBOURG M. (1), GAULE D. (2), BOLLY P-Y. (2), MARCOEN J M. (1)

(1) GRENeRA, Unité Systèmes Sol Eau, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, 5030 Gembloux, Belgique

(2) AQUALE – ECOFOX Développement sprl, 5380 Noville-les-Bois, Belgique

* c.vandenbergh@ulg.ac.be

Résumé

Quatre prises d'eau exploitées à Arquennes (Belgique) sont contaminées par le nitrate. Leurs bassins d'alimentation sont situés en zone agricole caractérisée par un sol limoneux sur un aquifère sableux. Depuis 2004, ces bassins servent de site pilote dans le cadre de l'évaluation du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA), transcription de la Directive « Nitrates » en droit wallon. Les modèles numériques SWAT et FEFLOW ont permis de simuler les flux d'eau et de nitrate depuis la surface jusqu'aux galeries. Après calibrage et validation des modèles (sur la base d'une caractérisation du sol et du sous-sol et de traçages en milieux saturé et non saturé), plusieurs scénarios de pratiques agricoles ont été simulés afin de prédire l'évolution qualitative des eaux. L'expérience d'Arquennes a démontré que le recours au couplage SWAT / FEFLOW permet de proposer des solutions environnementales现实的 pour atteindre les objectifs fixés par la DCE.

Mots clé :

Bassin versant, lixiviation, nitrate, engrais azoté, modélisation, protection de l'eau, captage, PGDA, traçage, SWAT, FEFLOW

Abstract

Four water catchments in Arquennes (Belgium) are contaminated by nitrate. The catchment basins are situated in agricultural area, mainly on loamy soils above sandy aquifer. Since 2004, these basins are used as pilot site for environmental evaluation of the Sustainable Nitrogen Management Programme (PGDA in french), transcript of the European Nitrates Directive in Walloon legislation. Numerical models (SWAT and FEFLOW) have allowed to simulate water flow and nitrate transport from surface to water catchments. After calibration and models validation (based on soil and groundwater characterization but also tracer tests in saturated and unsaturated areas), several agricultural practices scenarios were simulated to predict water qualitative evolution. Arquennes' experience have allowed to demonstrate that SWAT and FEFLOW coupling can propose realistic environmental solutions to reach the objectives fixed by the DCE.

Key words:

Watersheds, leaching, nitrate, nitrogen fertilizers, model, water protection, catchment area, Sustainable Nitrogen Management Programme, tracer test, SWAT, FEFLOW

1 INTRODUCTION

Les sites de prises d'eau d'Arquennes (Province du Hainaut, Belgique) sollicitent l'aquifère à caractère libre des sables du Bruxellien. Ces prises d'eau ont été contaminées par le nitrate dont les concentrations deviennent supérieures à 50 mg.l^{-1} à partir de la fin des années 1990 pour atteindre 70 mg.l^{-1} au milieu des années 2000.

Les bassins d'alimentation de ces captages sont situés en zone agricole et les prises d'eau ont fait l'objet d'un Arrêté ministériel établissant des zones de prévention (Moniteur belge, 2006).

De 2004 à 2010, un programme d'actions, financé par la Société Publique de Gestion de l'Eau (SPGE), a été mis en œuvre par GRENeRA, AQUALE et Nitrawal (Deneufbourg et al, 2010a).

Ainsi, à partir de 2005, les deux bassins versants d'Arquennes ont servi de site pilote pour la mise en œuvre effective de bonnes pratiques agricoles en matière d'utilisation de fertilisants azotés et la détermination des améliorations à apporter à celles-ci pour atteindre les objectifs de qualité des eaux souterraines.

Les objectifs du programme d'actions ciblés par la recherche sont :

- d'encadrer les agriculteurs exploitant des parcelles situées dans les zones de prévention des sites de prises d'eau afin d'ajuster leurs pratiques agricoles aux règles fixées par le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA), transcription de la Directive Nitrates en Région wallonne et intégré dans le code de l'eau (transcription de la Directive Cadre Eau en Région wallonne) ;
- d'étudier et de mettre en place un outil d'aide à la décision en matière de prévention de la contamination des eaux par le nitrate d'origine agricole à proximité des ouvrages de prises d'eau ;
- d'évaluer la dynamique de réponse de l'aquifère à une modification des pratiques agricoles en surface (détermination du temps nécessaire pour atteindre les objectifs de qualité des eaux souterraines, en particulier au droit des galeries captantes).

2 CARACTERISATION DES BASSINS PILOTES D'ARQUEENNES

2.1 Description physique des bassins pilotes d'Arquennes

Quatre prises d'eau (E1, E2, G3 et G6 – Fig. 1) sont exploitées sur le territoire d'Arquennes par la Société wallonne des Eaux (SWDE) pour un débit annuel de l'ordre de $160000 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$. Ces prises d'eau constituent les exutoires de deux bassins versants de 31 et 47 ha.

Les bassins pilotes sont localisés dans le bassin hydrographique de l'Escaut, sur un des bas-plateaux de la Moyenne Belgique. Leur relief peut être qualifié de mollement ondulé. L'altitude varie entre 120 et 160 m (par rapport au niveau moyen de la mer). Un levé de terrain par DGPS (3600 points) a été réalisé afin d'élaborer un MNT nécessaire pour la délimitation des bassins topographiques.

La région d'Arquennes se situe à la limite entre le Massif du Brabant et le Synclinorium de Namur et se caractérise par des roches plissées d'âge Paléozoïque recouvertes par des dépôts tabulaires d'âge Eocène (dépôts marins constitués de sables et d'argiles).

La nappe étudiée s'écoule dans l'aquifère des sables éocènes (Formations de Lede, de Bruxelles et de Mons-en-Pévèle) qui constitue une nappe de pores à caractère libre et d'une épaisseur cumulée comprise entre 15 et 30 mètres. Sous l'aquifère des sables éocènes se trouve l'aquiclude des argiles yprésiennes (Formation de Carnières) qui

assure une barrière hydrogéologique entre l'aquifère des sables éocènes et l'aquifère des calcaires dévono-carbonifères sous-jacent. Les sables éocènes sont surmontés d'une épaisseur variable (entre 2 et 15 mètres) d'alluvions et de limons quaternaires d'origine éolienne.

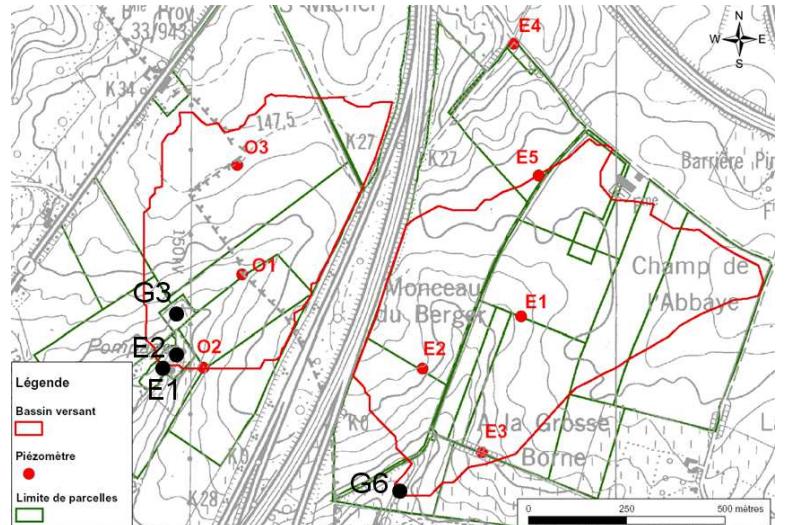


Fig. 14 Localisation des bassins versants, prises d'eau et piézomètres

Les sols des plateaux et des pentes sont limoneux ou sablo-limoneux, généralement profonds et à drainage favorable. Leur valeur agricole est élevée à très élevée. Les sols des vallées sont sans développement de profil sur des matériaux limoneux ou limono-sableux à drainage favorable à imparfait.

Le climat de la région est qualifié de tempéré et humide. La pluviométrie moyenne à Arquennes est de 930 mm par an (2000 à 2009). La recharge en eau utile a lieu durant la période novembre – mars (56 mm d'eau utile en moyenne). La température moyenne mensuelle durant ces dix années est comprise entre 3,4 °C. et 17,9 °C.

Les bassins versants sont situés exclusivement en zone agricole. Les 20 parcelles présentes sur les deux bassins sont cultivées par sept agriculteurs, principalement avec des céréales (froment d'hiver, escourgeon), de la betterave, du maïs, de la pomme de terre et de la chicorée. Seule une parcelle est occupée par une prairie (moins de 1 ha).

L'encadrement des agriculteurs exploitants sur les bassins d'Arquennes est réalisé par Nitrawal en vue d'assurer une gestion efficace de l'azote (organique et minéral) par une fertilisation raisonnée (méthode du bilan) et un recours maximum aux CIPAN dans le respect du PGDA.

2.2 Caractérisation hydrogéologique

Huit piézomètres ont été forés et équipés au droit (7) des deux bassins et en bordure (1) de ceux-ci.

Ce réseau de piézomètres a permis de caractériser le sol, le sous-sol et l'aquifère, de préciser les gradients d'écoulement, les conductivités hydrauliques de la nappe (comprises entre $1E-6$ et $2E-5 \text{ m.s}^{-1}$) et les paramètres hydrodispersifs de l'aquifère, tant en milieu saturé que non saturé, d'estimer la dynamique de l'aquifère en précisant les temps de transfert au sein de ces milieux et de suivre l'évolution de la qualité de l'eau de l'aquifère via un échantillonnage mensuel.

Des essais de traçage ont été réalisés en vue de préciser les paramètres hydrodynamiques locaux des milieux non saturé et saturé (Gaule et Bolly, 2010).

Un premier essai de traçage a été réalisé (avril 2006) en milieu non saturé via l'injection d'uranine au droit d'une planche d'épandage. Cet essai a fait l'objet d'un monitoring chimique (mesure des concentrations en traceur au droit de la nappe – piézomètre PZE3 et galerie G6) et débitmétrique (mesure du débit à la galerie G6) durant plus de trois ans.

Le second essai de traçage a été réalisé (mars 2007) en milieu saturé via l'injection de naphtionate dans la zone crépinée du piézomètre PZE3. Un monitoring chimique et débitmétrique a été réalisé à la galerie G6 durant 4 mois.

Les vitesses de migration des traceurs observées dans la phase liquide durant ces essais sont mentionnées ci-après (Tableau 1).

Tableau 1 Vitesses de migration des traceurs déterminées par essais de traçage (phase liquide)

Phase	non saturée	saturée
Type de migration	verticale	horizontale
Vitesse de première arrivée (cm.j ⁻¹)	2,2	4800
Vitesse du pic (cm.j ⁻¹)	1,5	3750

Des tarières de reconnaissance réalisées dans la zone non saturée, au droit de la planche d'épandage, ont permis de suivre l'évolution du traceur durant 29 mois et d'estimer des vitesses de migration au sein de la matrice solide, déterminées après analyses des lixiviats. Ces vitesses sont de l'ordre de 0,09 cm.j⁻¹.

Sur la base de ces vitesses de migration, et à l'échelle des bassins, les temps de migration estimés pour un transfert d'eau entre la surface topographique et la surface de la nappe apparaissent prépondérants et sont compris entre 8 et 16 mois.

3 COUPLAGE DES MODELES NUMERIQUES SWAT ET FEFLOW

L'originalité de l'approche proposée repose sur le couplage des deux logiciels suivants :

- pour l'étude du transport dans la zone racinaire (en milieu non saturé), le logiciel SWAT (Neitsch et al, 2005) est utilisé afin de modéliser les réactions du cycle de l'azote et la distribution du nitrate dans les eaux de percolation (jusqu'à une profondeur de 2 mètres) ;
- pour l'étude de la migration verticale du nitrate en milieu non saturé (depuis 2 mètres de profondeur jusqu'au droit de la nappe) ainsi que pour l'étude de la migration horizontale du nitrate en milieu saturé, le logiciel FEFLOW (Diersch, 2009) est utilisé complémentairement.

3.1 Modélisation des flux et du transport dans la zone racinaire (SWAT)

Les pratiques culturales des agriculteurs (dates de semis, de récolte, fertilisation) relevées par Nitrawal constituent une des entrées du modèle, tout comme la topographie des bassins, les données « sol », le climat et l'occupation du sol.

La première étape du processus de modélisation consiste à calibrer le modèle SWAT pour simuler les aspects quantitatifs (évapotranspiration, percolation). La deuxième étape consiste à calibrer le modèle pour simuler les aspects qualitatifs (exportation d'azote par les récoltes et lixiviation du nitrate) (Deneufbourg et al, 2009). Les « outputs » de ces simulations servent alors de données d'entrées (« inputs ») au modèle FEFLOW.

Le calibrage de SWAT se fait sur les années 2000 à 2005 sur le bassin pilote est en veillant à reproduire de manière satisfaisante les rendements observés, les différents

termes du bilan hydrique (évapotranspiration, ruissellement, percolation) et la lixiviation du nitrate.

La validation du calibrage du modèle est effectuée en comparant les résultats (rendement des cultures, bilan hydrique, lixiviation de l'azote nitrique) des simulations aux observations réalisées sur le bassin est au cours de la période 2005 – 2007 et sur le bassin ouest au cours de la période 2000 – 2007. Une fois que les résultats des simulations se rapprochent des valeurs attendues sur le terrain avec un degré de précision suffisant (Fig. 2), le calibrage du modèle est considéré comme validé et des simulations prospectives intégrant des modifications de pratiques culturales peuvent être réalisées.

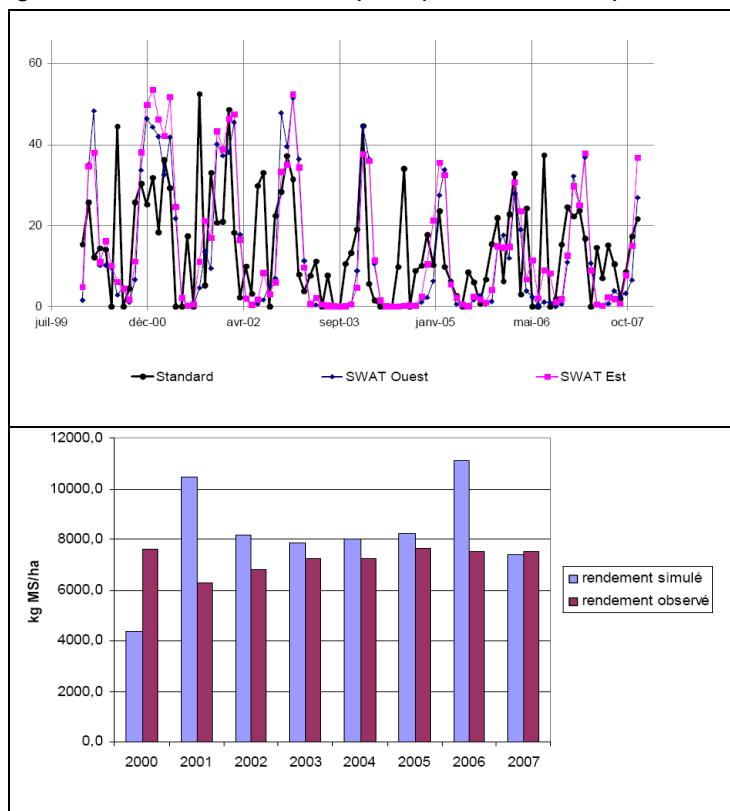


Fig. 15 Exemple de validation des flux d'eau et de simulation des rendements de blé

Ainsi, en plus du scénario initial (qui correspond aux pratiques renseignées par les agriculteurs au cours de la période 2000 – 2007), cinq autres scénarios théoriques ont été testés pour la même période 2000 – 2007 : réduction de 50% de la fertilisation minérale, suppression de tout apport d'engrais de ferme (avec ou sans compensation raisonnée avec une fertilisation minérale) et prairie de fauche (avec ou sans fertilisation minérale).

Les simulations prospectives réalisées pour cette même période à l'échelle de ce bassin versant indiquent (Fig. 3) que les pratiques les plus efficaces pour diminuer les teneurs en nitrate dans l'eau de percolation sont :

- la diminution des superficies de cultures « intensives » et le remplacement de ces surfaces par des prairies avec des concentrations en nitrate dans l'eau de percolation (à 2 m de profondeur) de l'ordre de $10 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$ après deux années de mise en œuvre de ces pratiques ;
- une diminution des apports d'azote sous forme organique (dans le contexte d'apport régulier des engrains de ferme du bassin pilote est) avec des concentrations finales en nitrate dans l'eau de percolation de l'ordre de $30 \text{ à } 45 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$.

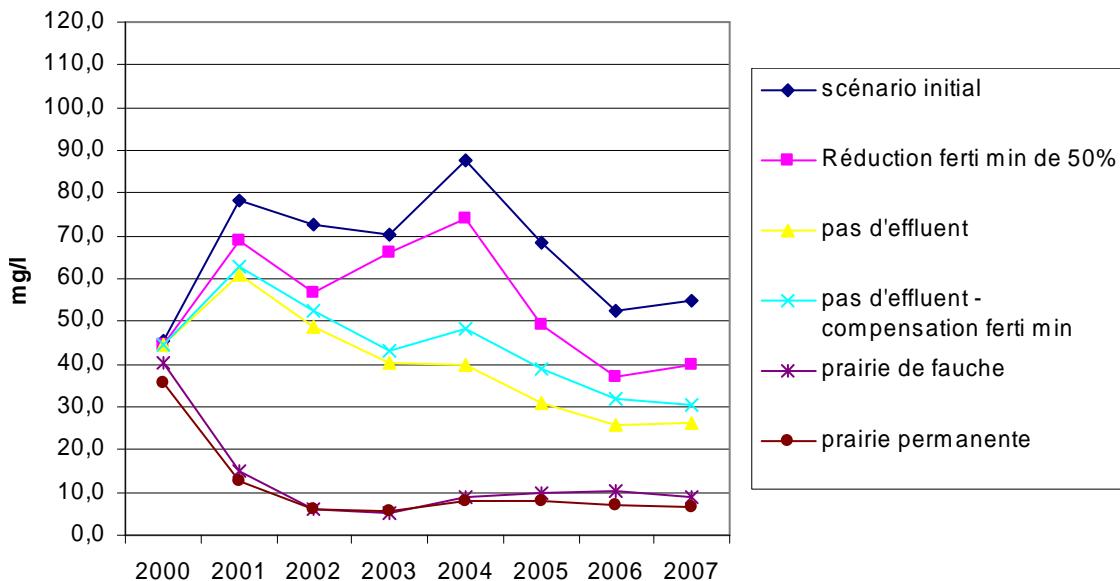


Fig. 16 Récapitulatif des tests de scénarios : impact sur la qualité de l'eau de percolation – bassin est

3.2 Modélisation des flux et du transport dans la zone vadose et la zone saturée (FEFLOW)

Le modèle 3D développé à l'aide de FEFLOW s'étend au-delà de la zone des bassins versants pris en compte pour le développement du modèle SWAT pour intégrer tout le bassin hydrogéologique du ruisseau des Trieux (frontières externes supposées à flux nul).

Compte tenu, d'une part, de l'absence de données hydrogéologiques et hydrogéochimiques ayant un véritable caractère 3D pour l'ensemble du milieu non saturé et, d'autre part, des temps de calculs extrêmement conséquents requis pour la simulation 3D du transport en milieu non saturé, il a été jugé opportun de développer la modélisation à l'aide du logiciel FEFLOW comme suit :

- précalibrage d'un modèle d'écoulement et de transport 3D pour le milieu saturé afin de définir les axes de flux principaux contribuant à l'alimentation des galeries ;
- transposition du modèle 3D vers un modèle 2D défini le long de l'axe de flux principal alimentant la galerie G3 (Fig. 1) ;
- calibrage du modèle 2D pour le milieu non saturé et saturé, en régime transitoire ;
- exploitation du modèle 2D via des simulations prédictives ayant pour objectifs :
 - d'une part, d'estimer l'inertie du système (en l'occurrence le délai requis pour qu'une période donnée d'amélioration des pratiques agricoles impacte positivement la qualité de la ressource en eau) ;
 - d'autre part, d'estimer les concentrations maximales admissibles en nitrate permettant d'induire durablement un respect des normes de qualité de la ressource en eau ; à contrario d'estimer la hausse des concentrations en nitrate dans la ressource en eau si aucune mesure de protection n'était apportée.

Le modèle conceptuel, déduit des observations et données acquises sur le terrain, est constitué de trois ensembles lithologiques distincts : limons quaternaires, sables aquifères de la Formation de Bruxelles et sables aquifères de la Formation de Mons-en-Pévèle. Le toit de la Formation aquiclude de Carnières constitue la base imperméable du modèle conceptuel.

Le modèle conceptuel 2D a été réalisé à partir de la coupe 2D issue du modèle 3D. Il est également constitué des trois ensembles lithologiques distincts précités et limité

latéralement par la galerie G3 (aval) dont le niveau est supposé constant et par le piézomètre PZE5 (Fig. 1) dont le niveau d'eau est variable mais connu.

Des conditions initiales (piézométrie, saturation, concentrations en nitrate dans la nappe) et aux frontières (percolation et concentrations en nitrate déduite du modèle SWAT, niveaux d'eau de la galerie G3 et du piézomètre PZE5) sont imposées dans le modèle numérique 2D et les propriétés de matériaux sont transposées depuis le modèle 3D.

3.2.1 Validation des résultats

Le modèle numérique 2D a été jugé calibré et a permis de reproduire les écoulements et le transport en régime permanent et/ou transitoire des éléments suivants :

- pour la période 2000 – 2007, l'évolution mensuelle des débits (Fig. 4 gauche) et des concentrations en nitrate à la galerie G3 (Fig. 4 droite) ;
- pour décembre 2007, le gradient piézométrique vérifié à la fin de la période de calibrage ;
- pour les périodes de traçages, les vitesses de migration des traceurs en milieu saturé et non saturé ;
- pour la période 2005 – 2007, les concentrations en nitrate au droit des piézomètres PZO1 et PZE5 présents le long de la coupe 2D.

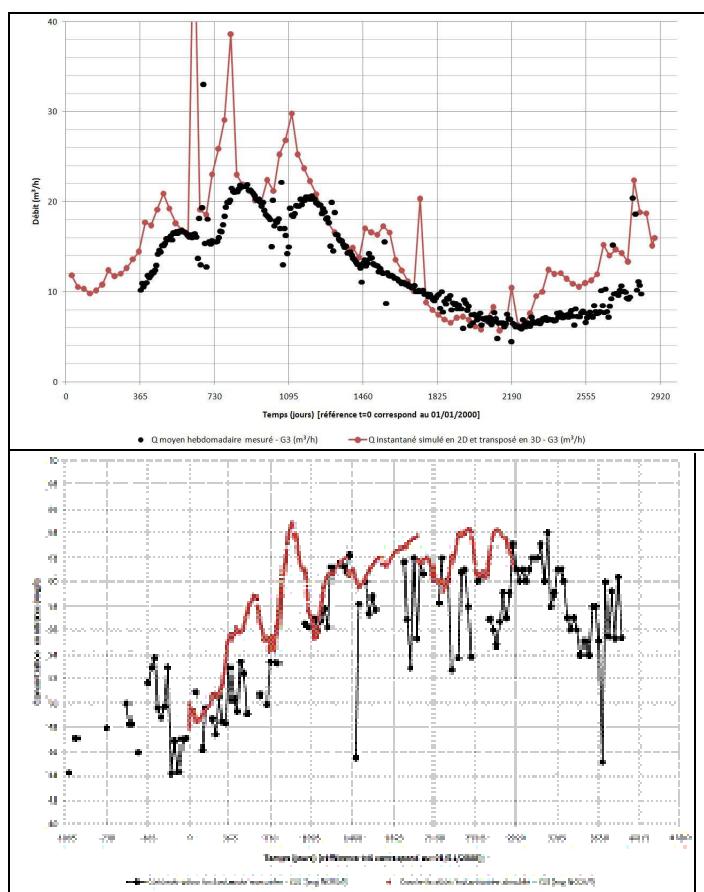


Fig. 17 Exemple de résultats du calibrage du modèle numérique 2D (comparaison entre valeurs simulées (rouge) et valeurs mesurées (noir))

3.2.2 Simulations prédictives

Une fois le modèle numérique 2D jugé à même de représenter l'évolution des écoulements et du transport, tant en régime transitoire que permanent mais également tant en milieu non saturé qu'en milieu saturé, il a été exploité à des fins prédictives afin d'évaluer l'évolution future des concentrations en nitrate à la galerie G3 et dans la nappe selon divers scénarios réalisables de mise en œuvre de pratiques agricoles. Les inputs retenus (percolation et concentration en nitrate à 2 m) correspondent aux outputs des scénarios simulés avec SWAT (cf. 3.1).

Les résultats des simulations sont les suivants (Fig. 5) :

pour une poursuite des pratiques agricoles telles que pratiquées avant la mise en œuvre du PGDA, les concentrations en nitrate à la galerie G3 n'auraient pas permis d'atteindre un bon état qualitatif de la nappe (concentrations toujours supérieures à 58 mg.l⁻¹, courbe rouge) ;

la mise en œuvre du PGDA à partir de 2007 (scénario réellement testé) permet d'atteindre un bon état qualitatif de la nappe à l'horizon 2012 – 2013 (concentrations devenant inférieures à 50 mg.l⁻¹, courbe orange). Les analyses récentes (septembre 2012) réalisées sur les eaux de la galerie G3 (qui continue de faire l'objet d'un monitoring mensuel) confirment les prédictions de cette simulation réalisée en juin 2010 ;

la dynamique de décroissance des concentrations en nitrate à la galerie G3 aurait pu être accélérée (gain de temps de l'ordre de 30 à 50 %) en cas de mise en place de contraintes plus importantes (réduction de la fertilisation de 50 %, courbe verte, ou prairies de fauche, courbe mauve).

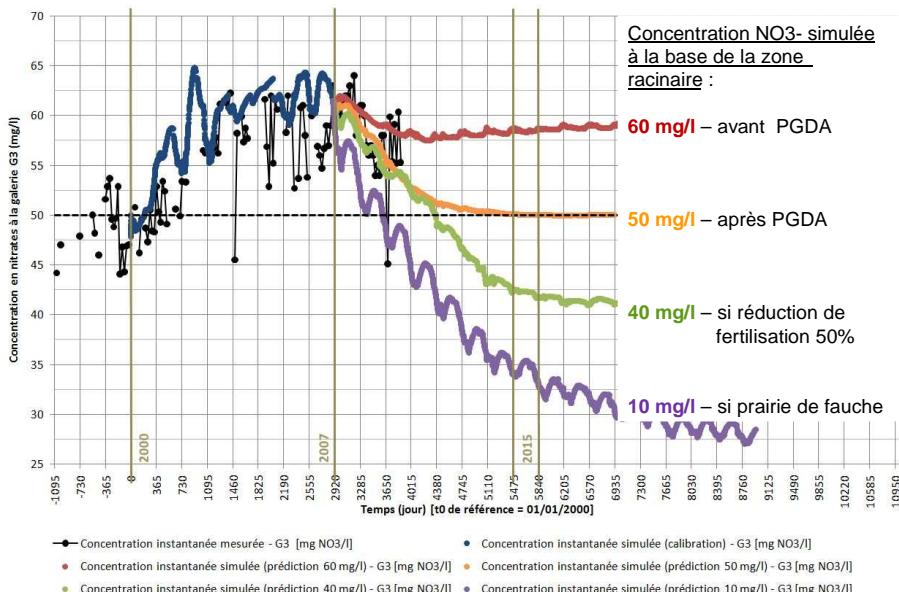


Fig. 18 Résultats des simulations prédictives FEFLOW – Concentrations en nitrate à la galerie G3

4 CONCLUSIONS

La mise en œuvre effective du PGDA à partir de 2005 sur les bassins pilotes d'Arquennes a permis d'observer une diminution des concentrations en nitrate depuis 2008 dans l'eau captée aux galeries et de tendre aujourd'hui vers un meilleur état qualitatif (de l'ordre de 50 mg NO₃.l⁻¹).

Sur la base d'une caractérisation détaillée des bassins pilotes, la modélisation du devenir du nitrate a été réalisée depuis son apport sur le sol jusqu'aux prises d'eau. L'originalité de la méthode développée dans le cadre de ce projet réside dans le couplage des modèles SWAT (pour la zone racinaire) et FEFLOW (pour la zone vadose et la zone saturée).

Ces deux modèles ont été calibrés et sont à même de reproduire les observations (rendement des cultures, débits, concentrations en nitrate dans les prises d'eau...) recueillies sur le terrain. Ils ont alors été exploités à des fins prédictives afin d'évaluer l'évolution future des concentrations en nitrate à la galerie et dans la nappe selon divers scénarios agricoles.

Ces simulations permettent de préciser les délais nécessaires pour observer une amélioration significative des concentrations en nitrate dans la nappe et en particulier à la galerie G3.

Cette étude a permis de valider le couplage SWAT-FEFLOW comme outil d'aide à la décision en matière de protection des eaux contre la contamination par le nitrate d'origine agricole à proximité des prises d'eau. Ainsi, il est possible de transposer ce couplage à d'autres sites pour :

cibler plus précisément les parcelles et les exploitations agricoles à encadrer pour s'assurer de la bonne mise en œuvre du PGDA nécessaire à une amélioration de la qualité des eaux souterraines et des captages ;

estimer la durée minimale avant d'observer concrètement l'effet sur l'amélioration de la qualité des eaux souterraines et des captages visés ou préciser les pratiques agricoles à mettre en œuvre pour observer des résultats sur la qualité de l'eau dans un délai imparti.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Benoit J., Gaule D., Khalidi M., Corswarem I., Bolly P.-Y., Hupin F., Marcoen J.M , 2009 – Programme d'actions pour la protection des captages contre les contaminations d'origine agricole – Bassins pilotes d'Arquennes. *Rapport d'activités annuel intermédiaire 2009. Convention SPGE-Nitrawal.* 72 pages. Gembloux, Belgique
(http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/Rap_activites/Arquennes/Rapport_2009.pdf)
- Deneufbourg M., Vandenberghe C. et Marcoen J.M., 2010a – Mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote et évaluation d'impact à l'échelle d'un bassin versant agricole (Arquennes, Belgique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2010* 14(S1), 27-34.
<http://www.pressesagro.be/base/text/v14ns1/27.pdf>
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Marcoen J.M , 2010b – Programme d'actions pour la protection des captages contre les contaminations d'origine agricole – Bassins pilotes d'Arquennes. *Rapport d'activités final GRENeRA. Convention SPGE-Nitrawal.* 113 pages. Gembloux, Belgique
http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/Rap_activites/Arquennes/Rapport_final_2010.pdf
- Diersch H. -J.G., 2009 - FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, Reference Manual. Berlin: DHI – WASY GmbH. (www.feflow.info)
- Gaule, D. et Bolly, P.-Y, 2010 – Bassins pilotes d'Arquennes – Etude hydrogéologique approfondie – Modélisation mathématique. *Rapport R-2010-024*, 226 pages
http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/Rap_activites/Arquennes/Aquale_rapport_final_2010.pdf
- Moniteur belge, 2006 - Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée des ouvrages de prise d'eau souterraine de catégorie B (potabilisable) dénommés Arquennes E1, Arquennes G3, Arquennes E2 et Arquennes G6, sis sur le territoire des communes de Nivelles et Seneffe (M.B. 06.12.2006) (<http://environnement.wallonie.be/legis/eau/easou117.htm>)
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2005. Soil and Water Assessment tool. Theoretical documentation – Version 2005. *Temple: USDA Agricultural Research Service.*