

Évaluation de l'efficacité de différentes stratégies de restauration de la qualité des eaux souterraines par modélisation du transfert des nitrates – Cas des formations alluviales du Val de Saône du secteur de Tournus (Saône-et-Loire)

Jean-Christophe Comte ^{a,b}, Olivier Banton ^b, Antoine Villard ^c, François Kockmann ^c et Gilles Creuzot ^d

Face à la pollution croissante des eaux souterraines par les nitrates d'origine agricole, différentes mesures agri-environnementales ont été mises en place afin de protéger la ressource dans les captages d'alimentation en eau potable. Il faut maintenant évaluer les impacts de ces stratégies. S'appuyant sur des données acquises lors de différents suivis agronomiques et hydrogéologiques réalisés dans la région de Tournus, les auteurs nous présentent ici une approche couplée de modélisation du transfert des nitrates dans les nappes, dont les résultats permettent d'optimiser et de prioriser les actions correctives et leur localisation.

En région agricole, l'augmentation généralisée et progressive des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines a conduit à la mise en place de différentes mesures agri-environnementales de lutte contre cette pollution. Dans le département de Saône-et-Loire, la nappe alluviale de la Saône fournit 45 % de l'eau potable distribuée aux populations. Suite à la mise en culture des zones alluviales dans les années 80, les concentrations en nitrates des puits de captage ont sensiblement augmenté jusqu'à dépasser parfois la norme de potabilité de 50 mg/l. Face à ce constat, différentes dispositions préfectorales ont été prises à partir de 1992, dont la mise en place des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable (AEP) (encadré 1, p. 16) et différentes mesures agri-environnementales (MAE) (encadré 2, p. 17) qui ont permis une amélioration notable et rapide de la qualité des eaux captées.

Dans ce contexte de protection de la ressource, la Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire a lancé en 1998 un vaste programme d'études visant à évaluer l'impact des stratégies de réduction de la contamination par les nitrates. Différents suivis agronomiques et hydrogéologiques ont été ainsi mis en place dans les zones d'alimentation des champs captants de Boyer et de l'Abergement de Cuisery, dans la région de Tournus : (1) mesure des flux de nitrates sous racines sur 15 parcelles équipées de bougies poreuses ; (2) mesure des concentrations en nitrates dans les captages AEP et des niveaux de la nappe alluviale sur 17 piézomètres.

Bénéficiant des données acquises à ce jour, et afin d'évaluer l'efficacité de ces différentes mesures

agri-environnementales pour la restauration de la qualité des eaux souterraines, trois types de modélisation couplés ont pu être mis en œuvre : (1) une modélisation des flux de nitrates dans les sols des parcelles équipées de bougies poreuses (modèle AgriFlux) ; (2) une modélisation du transfert des nitrates dans la nappe (modèles MODFLOW et MT3D) ; la description technique des modèles est présentée dans l'encadré 3 (p. 18). Faisant suite au premier article ayant présenté la modélisation par AgriFlux des flux de nitrates sur les 15 sites de bougies poreuses (Villard *et al.*, 2003), ce présent article expose les résultats de la modélisation couplée du transfert des nitrates dans le système sols-nappes.

Le site d'étude

Quatre formations géologiques d'origine sédimentaire s'individualisent dans le complexe alluvial de Tournus : (1) les sables et argiles de Chagny d'âge plio-quadernaire, (2) la formation de Saint Cosme, argilo-marneuse à base sablo-graveleuse, d'âge quadernaire ancien, (3) la terrasse sableuse de Villefranche, d'âge Würm ancien, et (4) les alluvions fluviales argileuses d'époque Würm terminal à actuel (figure 1, p. 19). Ce complexe alluvial repose tantôt sur un substratum calcaire d'âge jurassique en bordure du Massif Central (chaînon de Tournus), tantôt sur les marnes de Bresse d'âge Pliocène en zone intérieure du fossé bressan.

Dans le secteur d'étude, et plus généralement dans le Val de Saône, les formations aquifères privilégiées sont les alluvions récentes de la Saône (alluvions grossières de remplissage du lit mineur)

Les contacts

a. HYDRIAD,
route de Saint-Géniès,
30730 Saint-Bauzély
b. Université
d'Avignon, Laboratoire
d'hydrogéologie,
33, rue Louis Pasteur,
84000 Avignon
c. Chambre d'agricul-
ture de Saône-et-Loire,
59, rue du 19 mars
1962, BP 522,
71010 Mâcon Cedex
d. Direction régionale
de l'environnement
Bourgogne,
10 bd Carnot,
21000 Dijon

Encadré 1

Les périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable

Selon l'article L. 1321-2 du code de la santé publique, les types de périmètres de protection sont au nombre de trois : périmètres de protection immédiate, rapprochée et éloignée. Aux termes de la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau, l'institution de périmètres de protection immédiate et rapprochée est obligatoire pour tous les points de captages déclarés d'utilité publique. La seule exception vise les captages naturellement protégés, qui doivent cependant être reconnus d'utilité publique.

La première loi sur l'eau du 6 décembre 1964 avait rendu l'établissement des périmètres de protection obligatoire pour tout nouveau captage créé après la date de publication de la loi ; la seconde loi sur l'eau du 3 janvier 1992 s'appliquait cette fois à tous les captages. L'article 13-1 de la loi donnait un délai de cinq ans, soit jusqu'au 5 janvier 1997, pour la mise en place des périmètres.

Le périmètre de protection immédiate s'étend généralement dans un rayon de quelques dizaines de mètres autour du point de captage. Sur ce périmètre, les seules opérations autorisées sont liées à l'entretien des installations de prélèvement d'eau, de la clôture obligatoire et au maintien de la couverture herbacée sans pâturage, avec fauche et évacuation de l'herbe.

Le périmètre de protection rapprochée couvre généralement une dizaine d'hectares autour et en amont hydraulique de l'ouvrage. L'objectif est de protéger le captage de la migration souterraine des substances polluantes. Les activités, installations ou dépôts peuvent être réglementés ou interdits s'ils risquent de nuire à la qualité des eaux (épandage, labour, fertilisation). En particulier, les exploitations agricoles dont le siège est situé dans un périmètre de protection déclaré d'utilité publique sont éligibles pour les travaux au programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole (encadré 2), co-financé par l'État et l'Agence de l'eau.

Le périmètre de protection éloignée est d'instauration facultative devant permettre de renforcer la protection contre les pollutions permanentes ou diffuses. Ce périmètre correspond à la zone d'alimentation du point d'eau, et parfois même à l'ensemble du bassin versant.

Source : MIQUEL, G., REVOL, H., 2003, *La qualité de l'eau et de l'assainissement en France* : rapport n° 215 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Paris, Sénat, Assemblée Nationale.

et les sables de Villefranche. Le niveau sablo-graveleux de base du Saint-Cosme constitue également une formation aquifère pouvant alimenter latéralement la nappe alluviale (figure 1). Tous les captages AEP de Boyer et de l'Abergement sont implantés dans ces terrasses. Les études antérieures ont montré que leurs matériaux constitutifs présentaient des transmissivités de 10^{-3} à 10^{-2} m²/s, des coefficients d'emménagement de 0,06 % à 12 % et des vitesses d'écoulement de la nappe de 0,5 à 8 m/j (CPGF¹, 1989 et 1991 ; SOGREAH², 1996).

Selon le secteur, le plancher et les épontes du réservoir principal sont constitués par les calcaires jurassiques fissurés/karstifiés, par les marnes de Bresse ou par la formation argilo-sableuse de Chagny. Ces terrains peuvent toutefois contribuer, par des mécanismes variés, à l'alimentation laté-

rale (voire profonde) de l'aquifère. CPGF (1989 et 1991) et SOGREAH (1996) ont proposé pour ces flux latéraux des débits de 36 à 80 m³/h par kilomètre, sans distinction entre alimentation par les versants et alimentation souterraine.

Les fluctuations de la nappe montrent une grande similitude avec celles de la Saône, traduisant une forte réactivité piézométrique aux variations du niveau de la rivière (Marel, 2003). Malgré le fait que les débordements de la Saône soient fréquents dans son lit majeur, la rivière joue principalement un rôle de drain pour la nappe (CPGF, 1989 et 1991). Marel (2003) a quant à elle montré que le débordement de nappe, dans certains secteurs, contribue également à l'inondation de la plaine lors des crues débordantes de la Saône. Durant ces périodes, l'alimentation de la nappe par les eaux de crue serait donc nulle ou négligeable.

1. Compagnie de prospection géophysique française.

2. Société grenobloise d'études et d'applications hydrauliques.

Les secteurs suivis par la Chambre d'agriculture coïncident avec les zones éligibles pour les MAE, mises en place entre 1995 et 2001, et sensées correspondre aux zones d'alimentation des champs captants (figure 2, p. 20). Les sols se classent en quatre familles : (1) sols argileux tapissant le lit majeur de la Saône et les zones déprimées de la plaine alluviale ; (2) sols limoneux des cônes alluviaux des affluents de la Saône ; (3) sols sableux constituant les reliefs de la terrasse de Villefranche ; (4) sols hétérogènes argilo-sableux formés aux dépens du Saint-Cosme supérieur.

Quatre types d'histoire culturelle sont identifiables (figure 2) : (1) parcelles de prairies permanentes et forêts ; (2) parcelles cultivées depuis leur retour, autour de 1980 ; (3) parcelles cultivées

jusqu'à leur remise en prairie autour de 1995 (mise en place des périmètres de protection des captages ou contractualisation des MAE) ; (4) prairies retournées récemment (depuis 1995). Dans la zone d'étude, le maïs demeure la culture largement majoritaire et la fertilisation des parcelles cultivées est principalement constituée de nitrate d'ammonium.

Paramétrage des modèles

Paramètres de transfert des nitrates dans les sols (AgriFlux)

Les propriétés intrinsèques des sols locaux ainsi que les chroniques pluviométriques, d'évapo-

Encadré 2

Les trois types de mesures : volontaires, incitatives et réglementaires, pour lutter contre la pollution des nappes par les nitrates d'origine agricole

Opération Ferti-Mieux

En 1990, la profession agricole, en accord avec les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, a initié une démarche de conseil, basée sur le volontariat, visant à mobiliser collectivement les agriculteurs sur des bassins d'alimentation stratégiques pour la préservation de la ressource en eau. Cette opération fait l'objet d'un cahier des charges exigeant et d'une procédure de labellisation.

En 1992, la Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire, en collaboration avec l'Institut national de la recherche agronomique met en place une opération de recherche-action-conseil « Cultivons l'eau potable » en Val de Saône, labellisée « Ferti-Mieux » à trois reprises (1992, 1996 et 2000). Les agriculteurs sont invités à mettre progressivement en pratique la gestion raisonnée des systèmes de cultures en intégrant notamment les arrières-effets prairiaux dans l'ajustement de la fertilisation minérale azotée. Suite aux conseils délivrés aux agriculteurs dans le cadre de l'opération « Ferti-Mieux », les apports d'engrais ont nettement baissé.

Mesures agri-environnementales (MAE)

Ce programme de soutien financier est accordé par l'Union européenne aux agriculteurs s'engageant par contrat pour cinq ans, sur une surface donnée, à respecter un cahier des charges de pratiques respectueuses de l'environnement. Deux types de MAE ont été contractualisés entre 1995 et 2001 :

- les MAE réduction d'intrants visent à réduire de 20 % les fertilisations azotées par rapport aux recommandations. L'aide financière doit couvrir les pertes de rendements ;
- les MAE conversions en herbage extensif aident les agriculteurs à remettre en prairie des parcelles labourées (engagement sur cinq ans uniquement).

Mise en place des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable

Cette mesure obligatoire s'est traduite en 1995 à Boyer et l'Abergement de Cuisery par la remise en prairie des parcelles dans les périmètres rapprochés. Les syndicats des eaux ont racheté l'ensemble de ces terrains.

La combinaison de ces trois types de mesures volontaires, incitatives et réglementaires a conduit à une amélioration notable de la qualité de l'eau dans les captages AEP.

Encadré 3

Les outils de modélisation utilisés

Modélisation du transfert dans les sols : le modèle AgriFlux

Le logiciel AgriFlux (Banton et Larocque, 1997) est un modèle mécaniste-stochastique, c'est-à-dire basé sur une représentation physique des processus et incorporant la variabilité des paramètres. Il permet de simuler le transfert vertical d'eau et de nitrates dans la zone non saturée (voir description du modèle dans Villard *et al.*, 2003).

Pour la présente modélisation, AgriFlux fournit les données d'entrée, en flux d'eau et de nitrates, aux modèles hydrogéologiques simulant l'écoulement et le transport dans la nappe. La distribution spatiale et temporelle de ces données doit tenir compte de la répartition spatiale des sols et des cultures, ainsi que de l'historique des pratiques culturales, notamment de fertilisation sur le territoire modélisé.

Modélisation des écoulements souterrains : le modèle MODFLOW

MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1984) est un modèle 3D en différences finies permettant la modélisation des écoulements dans les aquifères libres à captifs, mono ou multi-couches, ainsi que des relations nappe-rivière, considérant les possibles phénomènes de colmatage du lit mineur de la rivière. Dans la présente étude, la modélisation des écoulements de nappe a été réalisée à l'aide de MODFLOW, avec l'interface logiciel Visual MODFLOW (v.2.8.2.8, Waterloo Hydrogeologic Inc., 2000).

Modélisation du transfert des nitrates dans la nappe : le modèle MT3D

Le modèle MT3D (v.1.1, Zheng, S.S. Papadopoulos & Associates Inc., 1990) est un modèle 3D en différences finies qui permet la simulation du transport advectif, dispersif et/ou réactif en milieu poreux, en utilisant le champ de vitesse calculé à partir des résultats du modèle d'écoulement. MT3D est également intégré à l'interface graphique Visual MODFLOW.

transpiration et de température journalières locales pour la période de 1980 à 2003 (Novak, 2003 et 2004) ont été appliquées au modèle AgriFlux (encadré 3).

Pour cette même période, l'application de fertilisants traduit les deux principales pratiques de fertilisation du secteur d'étude (Comte *et al.*, 2005) : (1) les zones cultivées et fertilisées depuis leur retournement jusqu'à aujourd'hui ; (2) celles remises en prairie dans les périmètres de protection des captages et dont la fertilisation est par conséquent annulée à la date d'arrêt des cultures. De façon globale, les parcelles cultivées ont reçu une fertilisation annuelle de 160 kg N/ha entre la date de retournement et 1992. À partir de 1992, suite à la mise en œuvre de l'opération « Ferti-Mieux » et à la contractualisation des MAE de réduction d'intrants azotés, les apports annuels d'engrais ont progressivement baissé pour se stabiliser autour de 120 kg N/ha à partir de 1995 (figure 3, p. 22, graphique du haut). Par ailleurs,

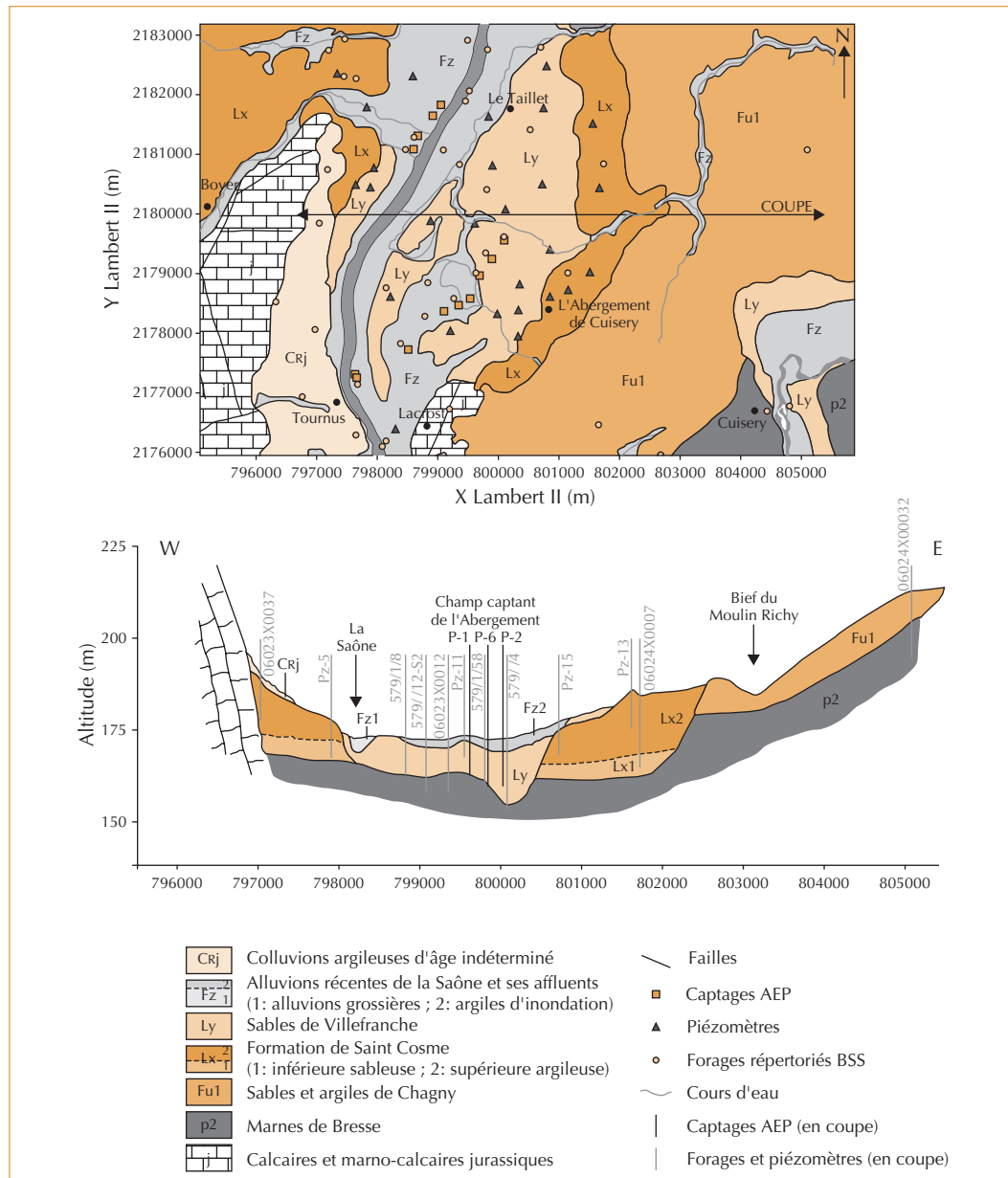
certaines parcelles du secteur de Boyer ont reçu des apports importants de lisiers.

Paramètres hydrodynamiques (MODFLOW)

Le domaine modélisé avec MODFLOW (encadré 3) a été discrétisé suivant un maillage carré de 100 m × 100 m, limité latéralement et verticalement conformément aux caractéristiques des formations géologiques présentes dans le Val de Saône. Le pas de temps des simulations est mensuel.

Les limites des zones de conductivités hydrauliques et d'emmagasinement modélisées se calquent sur la structure géologique alluviale : (1) matériel alluvial récent et sables de Villefranche ; (2) formation de Saint-Cosme. Les transmissivités sont caractéristiques d'aquifères alluviaux et les emmagasineurs traduisent une nappe libre à semi-captive dans le Saint-Cosme (tableau 1).

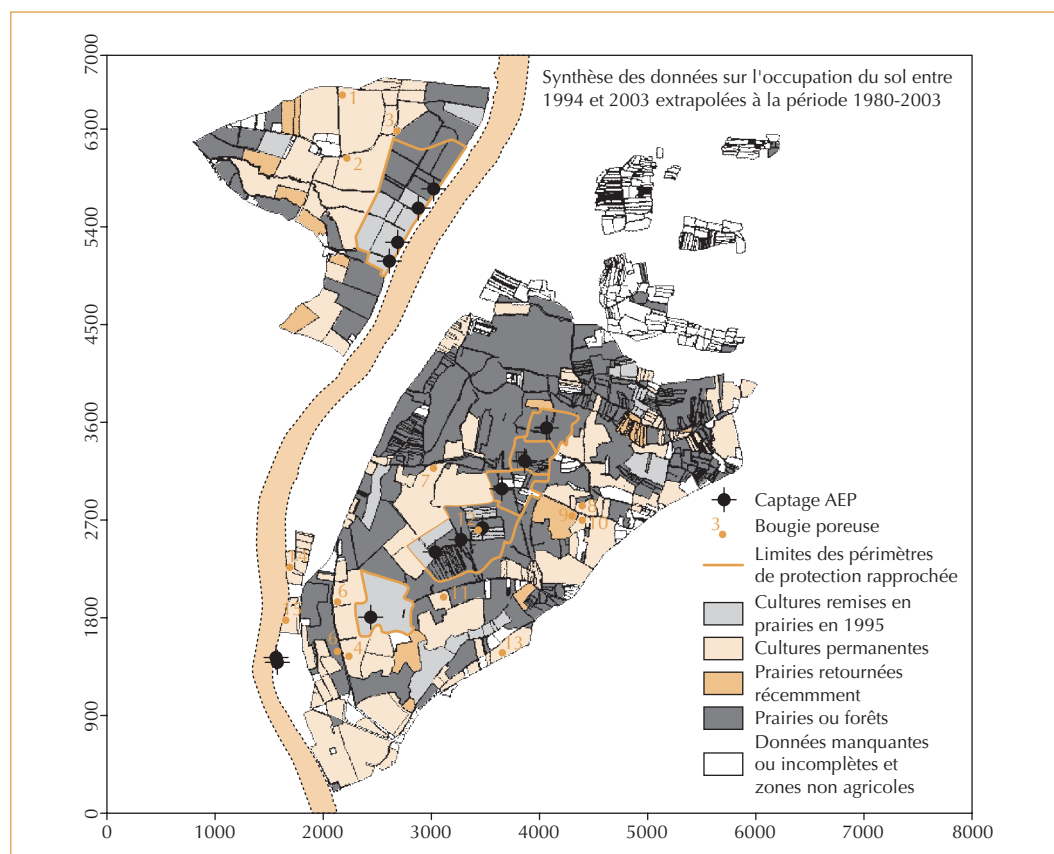
▼ Figure 1 – Carte et coupe géologiques de la plaine alluviale de Tournus (d'après la carte géologique de Tournus au 1/50000 – BRGM, et les coupes de forage de la banque de données BSS – BRGM).



▼ Tableau 1 – Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisés dans les modèles MODFLOW et MT3D.

	Alluvions récentes et terrasse de Villefranche	Saint-Cosme (rive gauche)	Saint-Cosme (rive droite)
Conductivité hydraulique (m/s)	10^{-3}	$2,10^{-5}$	$3,10^{-5}$
Transmissivité (m^2/s)	10^{-2}	$3,10^{-4}$	$2,10^{-4}$
Coefficient d'emmagasinement (%)	5 à 8	1	1
Porosité cinématique (%)	5 à 10	10	10

▼ Figure 2 – Carte d'occupation des sols dans les zones éligibles pour les MAE (d'après les données de la Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire).



La recharge de la nappe est constituée par les flux calculés à l'aide d'AgriFlux et par les flux imposés aux limites latérales du domaine. À chacune des unités pédo-culturelles est ainsi affectée une chronique mensuelle de recharge en eau. Des alimentations latérales, variant entre 8 et 22 l/s/km selon le secteur, sont également appliquées sur les limites de l'aquifère. Par ailleurs, la fluctuation des niveaux de la Saône est prise en compte à l'aide des mesures en aval du barrage d'Ormes (période de 1980 à 2002). Finalement, les débits des captages AEP correspondent aux volumes prélevés en 2000 (CPGF, 1989 et 1991).

Paramètres hydrodispersifs (MT3D)

Dans le modèle présent, les porosités cinématiques des différentes formations modélisées avec MT3D (encadré 3, p. 18), nécessaires au calcul des vitesses, ont été calibrées par calage du modèle. Ces valeurs de porosité cinématiques respectent celles

de la littérature et leur répartition est basée sur celle des emmagasins (tableau 1, p. 19).

Les concentrations en nitrates de la recharge (mg/l) proviennent des flux journaliers de nitrates (kg N/ha) et d'eau (mm/j) calculés par AgriFlux. La spatialisation de la recharge en nitrates découle directement de la distribution spatiale des apports de fertilisants et des types de sols. On distingue ainsi, pour chaque sol, les zones de prairies ou de forêts des zones cultivées, et ce dans ou hors des périmètres de protection rapprochée. Sous les zones non cultivées est appliqué un flux de nitrates constant de 10 mg/l correspondant au flux moyen naturel de nitrates résultant de la minéralisation de la matière organique. En amont du champ captant de Boyer, des flux azotés représentatifs des zones de culture ont été appliqués aux flux entrants pour tenir compte des apports du bassin amont non modélisé. Sur les autres limites latérales du système, des teneurs en nitrates de 10 mg/l ont été appliquées, reflétant

les concentrations observées dans les piézomètres implantés en bordure du domaine. Finalement, une teneur constante en nitrates de l'ordre de 10 mg/l a également été affectée pour la Saône conformément aux observations.

Résultats de simulation

Recharge de la nappe alluviale en eau et en nitrates (AgriFlux)

Les flux journaliers de nitrates et d'eau entrant dans la nappe ont été simulés à l'aide du modèle AgriFlux appliqué aux différentes combinaisons sols, cultures, pratiques de fertilisation, puis cumulés mensuellement. Ces flux montrent en particulier que (1) les concentrations maximales en nitrates sont observées sous les sols à dominante limoneuse, alors que les flux d'eau sont relativement faibles impliquant au final un lessivage modéré de nitrates, (2) les concentrations en nitrates et les flux d'eau sont élevés et montrent d'importantes variations saisonnières sous les sols à dominante sableuse où les apports de nitrates à la nappe sont importants, (3) les concentrations en nitrates et les flux d'eau sont faibles sous les sols à dominante argileuse et montrent peu de variations saisonnières, impliquant un faible drainage de nitrates, (4) les concentrations en nitrates et leurs variations saisonnières sous les sols composites sont semblables à celles des sols sableux, mais avec des flux d'eau moins élevés, induisant un lessivage de nitrates modéré (figure 3, p. 22). Les différents cas de pratiques agricoles (incluant les remises en prairie en 1995, les épandages de lisiers, etc.) ont tous été traités selon le même principe et les flux résultants calculés pour les zones correspondantes.

Écoulement des eaux souterraines (MODFLOW)

En régime permanent (régime moyen), la simulation des écoulements montre une circulation des eaux selon une orientation globale est-ouest, depuis les coteaux jusqu'à la Saône dont le rôle drainant est particulièrement net (figure 4, p. 23). On constate également que la totalité des apports d'eau provenant de la limite sud-est du domaine est interceptée par le champ captant de l'Abergement et dans une bien moindre mesure par les puits de Tournus. Le champ captant de Boyer intercepte quant à lui une part limitée des écoulements provenant du secteur nord-ouest (cône alluvial de la Natouze et du Bief Mort).

En régime transitoire, la comparaison des niveaux de nappe simulés et observés sur une base mensuelle entre 1998 et 2003 peut être effectuée (figure 5, p. 23). Nonobstant les légères sur ou sous-estimations locales et temporelles, les niveaux piézométriques sont globalement bien représentés par le modèle tant au niveau de la distribution spatiale de la piézométrie que de son évolution temporelle.

En termes de bilans hydrogéologiques, la nappe alluviale présente un débit moyen de renouvellement de l'ordre de 24 000 m³/j, alimenté à hauteur de 46 % par les apports latéraux, 43 % par la recharge verticale et 11 % par la Saône. Concernant les sorties, environ 40 % de la ressource renouvelable est prélevé par les captages AEP, la Saône drainant les autres 60 %. Pour le champ captant de Boyer, les prélèvements des captages proviennent pour 60 % des apports amont du bassin, pour 29 % des apports de la Saône et pour 11 % de la recharge en surface, alors qu'au niveau du champ captant de l'Abergement, apports latéraux amont et infiltrations verticales contribuent de façon presque égale.

Transfert des nitrates dans la nappe alluviale (MT3D)

De manière générale, les concentrations simulées sont en bonne adéquation avec celles mesurées, quels que soient le lieu ou la date d'observation. Également, les évolutions temporelles mesurées ou simulées des concentrations sont très semblables pour l'ensemble des puits (figure 6, p. 23). Ceci confirme les hypothèses de modélisation et valide à la fois les résultats d'AgriFlux (validés par ailleurs avec les observations sur bougies poreuses) et les résultats de la modélisation hydrogéologique.

La figure 7 (p. 24) illustre les concentrations en nitrates simulées dans la nappe alluviale pour les étiages d'août 1985, 1990, 1995, 2000 et 2004. L'année 1985 correspond à l'époque du retournement généralisé des prairies du Val de Saône. À partir de cette date, des entrées massives de nitrates dans la nappe ont lieu à l'aplomb des surfaces mises en culture, principalement sous celles cultivées sur sable. L'année 1990 illustre l'effet de l'augmentation progressive du nombre de parcelles mises en culture. Les concentrations de nitrates dépassent parfois 60 mg/l, en particulier en amont du champ captant de Boyer où ont lieu les épandages de lisier de bovins. L'année 1995 marque le pic de la pollution nitraté

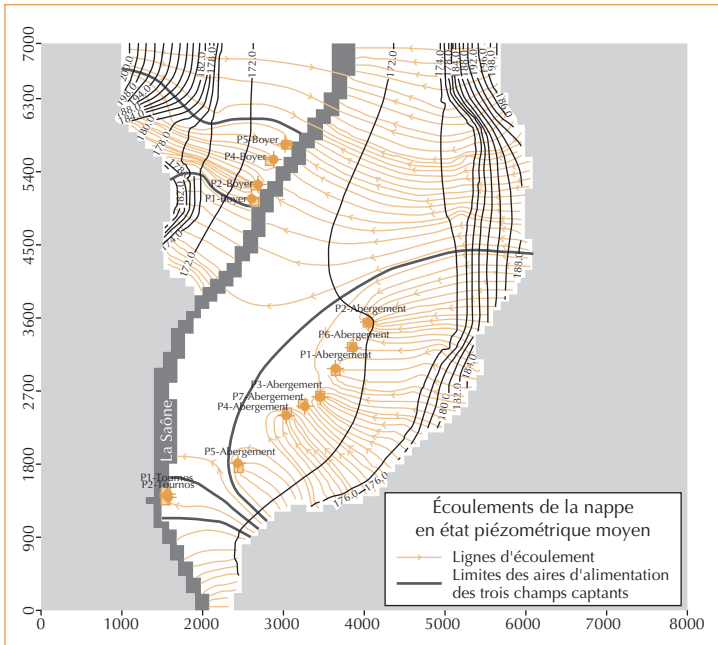


Figure 4 – Piézométrie et directions d'écoulement simulées par MODFLOW en régime permanent.

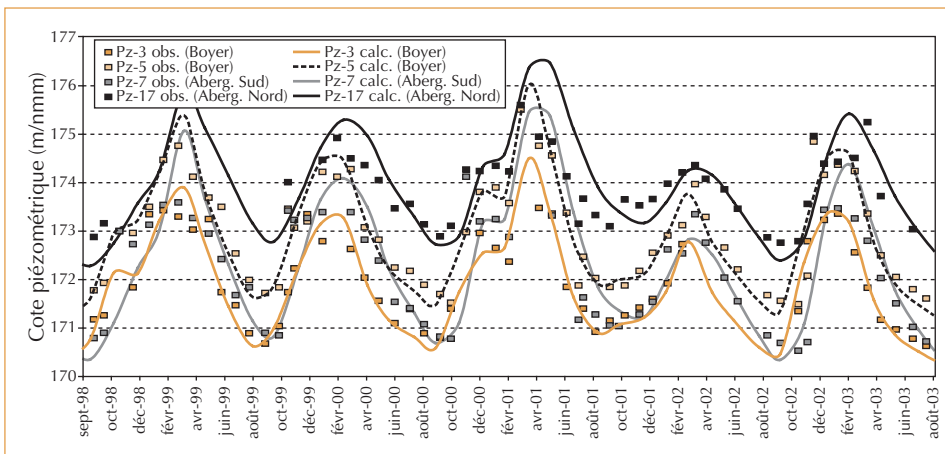


Figure 5 – Fluctuations piézométriques simulées et observées pour une sélection de quatre piézomètres représentatifs du secteur d'étude.

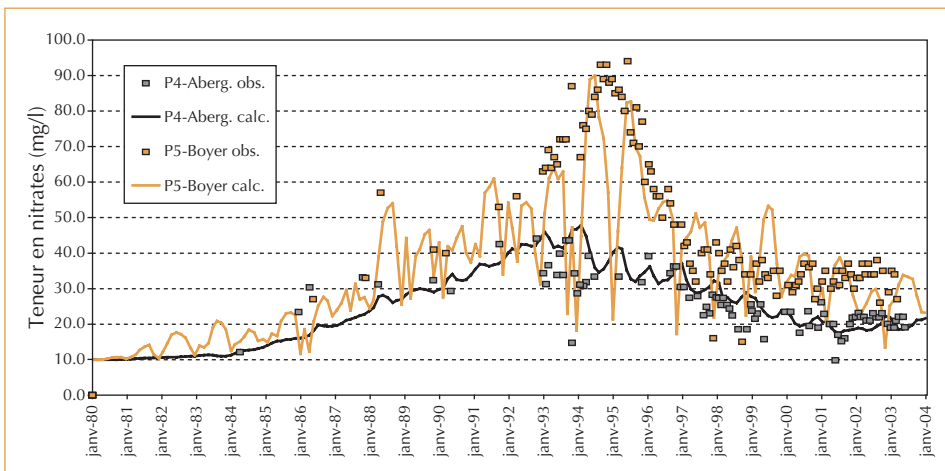
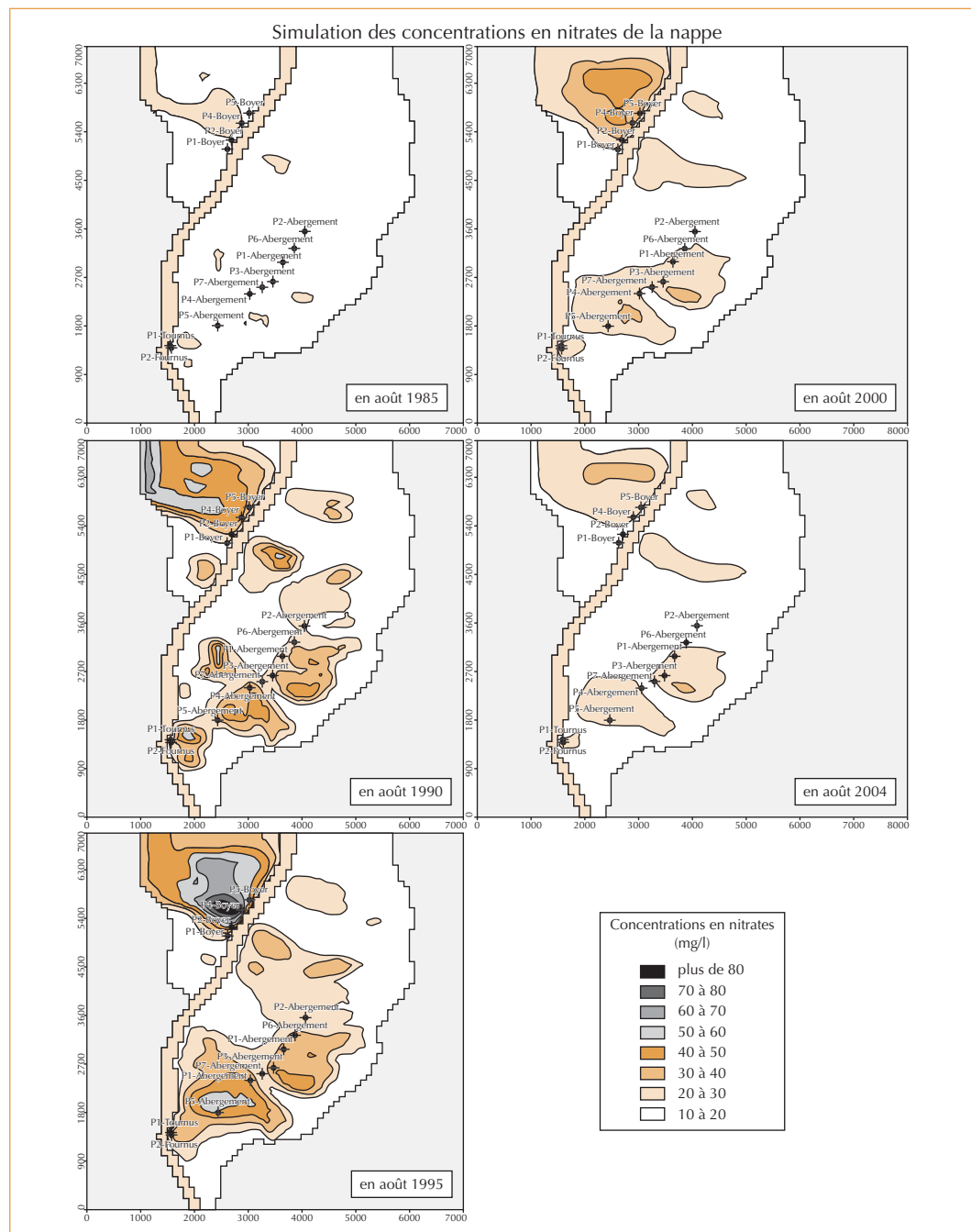


Figure 6 – Concentrations en nitrates simulées et observées sur deux puits représentatifs du secteur d'étude.

concentrations en nitrates suite aux différentes actions et mesures agri-environnementales mises en place à partir de 1992 (remise en prairie de certaines zones cultivées, diminution de la fertilisation sur les cultures). Cette baisse des teneurs est particulièrement spectaculaire en amont de Boyer

avec l'arrêt des épandages de lisiers (figures 6 et 7). L'année 2004 représente la situation actuelle où la restauration de la qualité de la nappe est presque atteinte avec des concentrations toutes inférieures à 40 mg/l et proches de 25 mg/l, pour des objectifs fixés de teneurs inférieures à 25 mg/l.



▲ Figure 7 – Évolution temporelle des concentrations en nitrates simulées par MT3D pour cinq périodes d'étiage.

Discussion générale

Pour le contexte du Val de Saône

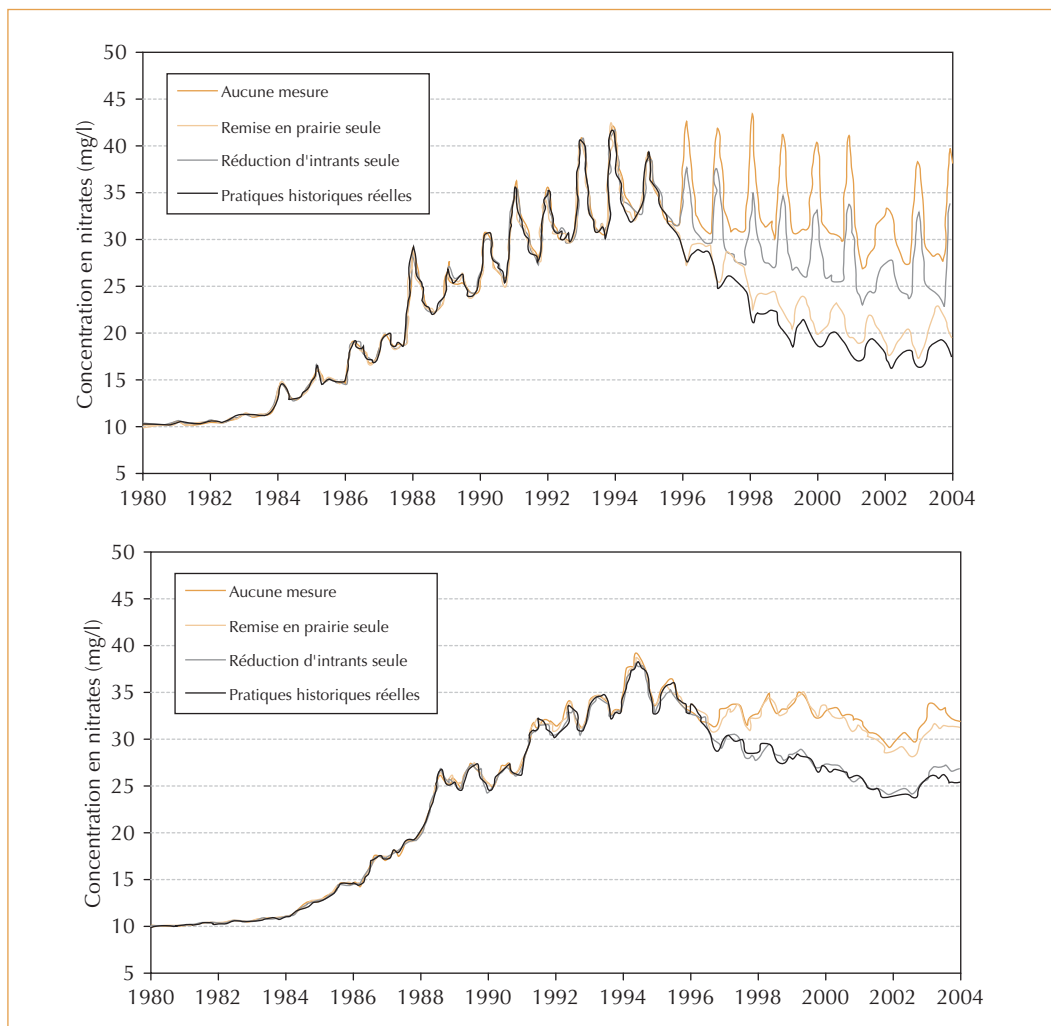
L'impact sur la qualité de l'eau des réductions des fertilisations azotées (conseils « Ferti-Mieux » et MAE réduction d'intrants) ou des mises en prairies (périmètres de protection des captages et MAE) peut être testé à l'aide du modèle. La figure 8 illustre l'effet séparé ou conjugué de la remise en prairie des parcelles entourant le puits de pompage et de la réduction des intrants dans la zone d'alimentation (périmètre éloigné) pour différents cas d'environnement pédologique. Ce

résultat montre le rapide impact des mesures mises en place et suivies par l'ensemble des agriculteurs. De manière générale, les teneurs en nitrates simulées diminuent à partir des années 1994-1995, que des mesures aient été prises ou non. Ces teneurs extrêmes sont dues à l'implantation maximale de cultures extensives à cette période, et en corollaire à une minéralisation maximale de l'azote organique liée au retournement des anciennes prairies permanentes.

Tel que le montre la figure 8-a, l'amélioration de la qualité des eaux captées par le puits de

▼ Figure 8 – Simulation des impacts des MAE (remises en prairies et réductions d'intrants).

a : contexte du puits P6 de l'Abergement, caractéristique d'un environnement sableux dans et en amont du périmètre de protection rapprochée. b : contexte du puits P3 de l'Abergement, caractéristique d'un environnement argileux dans le périmètre de protection rapprochée et sableux en amont de celui-ci.



pompage résulte presque entièrement des remises en prairie aux alentours du puits, du fait que les parcelles environnant le puits sont toutes sur sol sableux. La seule réduction des intrants, y compris autour du puits, n'aurait qu'un effet limité sur les concentrations en nitrates. À l'opposé, la figure 8-b illustre le cas de parcelles sur argile dans le périmètre rapproché et sur sable en amont de celui-ci. Dans ce cas, la remise en prairies des environs du puits n'a aucun effet, alors que les mesures de réduction d'intrants à l'amont de cette zone entraînent une baisse notable des concentrations.

Généralisation au contexte des plaines alluviales agricoles

L'application de la modélisation couplée Agri-Flux-MODFLOW-MT3D sur l'aquifère alluvial de Tournus a montré qu'il était possible de simuler et d'évaluer l'impact de différentes stratégies pour la reconquête de la qualité des eaux souterraines en contexte de plaine alluviale agricole. Les résultats de modélisation ont montré que les parcelles sur sable ont en effet un rôle primordial pour la qualité des eaux souterraines.

Plusieurs cas de figure sont schématiquement possibles :

- en l'absence de terrains sableux, la simple généralisation des pratiques de fertilisation « Ferti-Mieux » sur toutes les parcelles en cultures localisées dans les périmètres rapprochés et éloignés constitue la stratégie la plus pertinente ;
- en présence de sols sableux localisés uniquement en périmètres rapprochés, leur remise en prairie permanente, conjuguée au respect des pratiques « Ferti-Mieux » sur toutes les parcelles situées dans les périmètres rapprochés et éloignés, s'avère la stratégie à recommander ;
- en présence de sols sableux dans les périmètres rapprochés et éloignés, sont à conseiller la remise en prairie et la contractualisation de MAE visant la réduction d'intrants sur les sols sableux et la généralisation des pratiques « Ferti-Mieux » sur toutes les autres parcelles.

D'une manière générale, les modèles sont des outils pertinents pour évaluer l'efficacité des différentes mesures agri-environnementales et la priorisation des interventions agronomiques visant à restaurer la qualité des eaux souterraines. □

Remerciements

Cette étude a été conduite dans le cadre d'un partenariat scientifique et technique impliquant l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, la Direction régionale de l'Environnement Bourgogne, le Conseil général de Saône-et-Loire, le Syndicat mixte d'études Saône-Doubs et la Direction des affaires sanitaires et sociales de Saône-et-Loire, et bénéficiant des soutiens financiers de l'Agence de l'eau, du Syndicat mixte, du Programme européen LIFE Environnement, du Conseil général et du ministère de l'Agriculture. Les agriculteurs du secteur d'étude sont remerciés pour leur contribution à l'acquisition des données et pour leur implication dans la mise en place des mesures agri-environnementales.

Résumé

Afin d'évaluer l'efficacité des différentes stratégies agri-environnementales de lutte contre la pollution azotée des eaux souterraines, une modélisation du transfert des nitrates dans les sols et les nappes a été mise en œuvre dans le secteur des champs captants alimentant la région de Tournus et Louhans. Dans un premier temps, l'utilisation du modèle agro-environnemental AgriFlux, calibré dans le contexte du secteur d'étude, a permis de simuler pour chaque unité agro-pédologique du territoire les flux d'eau et de nitrates percolant jusqu'à la nappe. Dans un deuxième temps, l'application du modèle hydrogéologique MODFLOW-MT3D a permis de simuler le transfert de nitrates au sein de la nappe, sur la période 1980 à 2004. Cette modélisation couplée sol-nappe a montré que la nature du sol est le principal facteur conditionnant le risque de contamination dans le contexte étudié. Le lessivage des nitrates s'effectue de façon importante dans les sols sableux, très peu sous sols argileux. L'efficacité des différentes mesures agri-environnementales mises en place pour la restauration de la qualité de la ressource en eau potable a été quantifiée. Les meilleures améliorations s'obtiennent par une combinaison (1) de la remise en prairie des parcelles sur sable situées dans les périmètres de protection rapprochée et (2) d'une réduction de la fertilisation des parcelles en cultures sur sable, situées dans l'aire d'alimentation des puits en amont de ces périmètres. La remise en prairie sur les autres types de sol a un effet plus limité sur l'amélioration de la qualité. Par contre, la maîtrise de la fertilisation azotée sur les cultures reste indispensable et conditionne leur maintien dans les périmètres rapprochés et éloignés. En contexte alluvial agricole, la modélisation permet donc d'optimiser et de prioriser les actions et leur localisation.

Abstract

To assess the efficiency of different agro-environmental strategies used to reduce groundwater pollution by nitrates, transport modelling in soils and groundwater has been carried out on two withdrawal areas in an alluvial plain. In a first time, the agro-environmental model AgriFlux allowed the simulation of water and nitrates fluxes flowing to groundwater. This model was calibrated for each agro-pedological unit of the studied territory. In a second time, the application of the hydrogeological model MODFLOW-MT3D allowed the simulation of nitrate transport in groundwater for the 1980-2004 period. This soil-groundwater coupled modelling has shown that soil nature is the first factor that conditions the vulnerability to nitrates. Thus, nitrate leaching occurs preferentially under sandy soils. Efficiency of different agro-environmental operations for groundwater quality recovery was quantified. The best results are obtained by combination of (1) grassland re-installation on sandy agricultural lots located in near well protection perimeter and (2) fertilization reduction on sandy agricultural lots located in the well alimentation area upstream the near protection perimeter. On other soils, the effect of grassland on groundwater quality improvement is more limited. Nevertheless, the control of nitrate fertilisation remains essential and is justified in both near and far well protection perimeters. Modelling thus allows optimising and prioritizing agro-environmental actions in alluvial agricultural zones.

Bibliographie

- BANTON, O., LAROCQUE, M., SURATEAU, F., VILLENEUVE, J.-P., 1993, *AgriFlux : Logiciel d'évaluation des pertes environnementales de contaminants agricoles, Manuel d'utilisateur*, rapport scientifique INRS-Eau, n° R-380, Sainte-Foy, Québec.
- BANTON, O., LAROCQUE, M., 1997, *AgriFlux 2.0 : Logiciel d'évaluation des pertes environnementales de nitrates et pesticides, Manuel d'utilisation*, rapport INRS-Eau, Québec, Canada.
- COMTE, J.-C., VILLARD, A., KOCKMANN, F., BANTON, O., 2005, *Étude sur les champs captants de Boyer et de l'Abergement. Modélisation du transfert des nitrates dans la nappe*, rapport final, Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire, 74 p.
- CPGF, Syndicat Intercommunal des Eaux du Tournugeois, 1989, *Étude de vulnérabilité du champ captant de Boyer (Saône et Loire)*, étude 3448, 68 p.
- CPGF, Conseil général de Saône-et-Loire, 1991, *Étude de la vulnérabilité du champ captant du Louhannais (Saône et Loire)*, étude 3897, 38 p. + annexes.
- DIREN Bourgogne, Syndicat mixte d'études Saône-Doubs, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 1998, *Étude hydrogéologique Boyer, l'Abergement de Cuisery*, 16 p. + annexes.
- GUIGER, N., FRANZ, T., 2000, *Visual MODFLOW version 2.8.2.8, User's manual*, Waterloo Hydrogeologic Inc.
- MACDONALD, M.-G., HARBAUGH, A.-W., 1984, *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U.S. Geological Survey Open-File Report, 83-875, 528 p.
- MAREL, A., 2003, *Synthèse hydrogéologique de la nappe alluviale de la Saône, secteur de Tournus*, mémoire de DEA, université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 53 p. + annexes.
- NOVAK, S., 2003, *Étude sur les champs captants de Boyer et de l'Abergement de Cuisery. Simulation par le modèle AgriFlux des flux d'eau et d'azote nitrique sous racines*, rapport, Chambre d'agriculture de Saône et Loire, 35 p. + annexes.
- NOVAK, S., 2004, *Étude sur les champs captants de Boyer et de l'Abergement de Cuisery. Simulation par le modèle AgriFlux des effets des pratiques culturales et du climat sur les flux d'eau et d'azote nitrique sous racines*, rapport, Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire, 16 p. + annexes.
- SOGREAH, Conseil général de Saône-et-Loire, 1996, *Étude des nappes alluviales entre Châlon-sur-Saône et la Truchère*, étude 101210, 90 p. + annexes.
- VILLARD, A., NOVAK, S., BANTON, O., KOCKMANN, F., CRÉMILLE, E., 2003, *Étude des flux d'eau et d'azote nitrique sous racines sur deux champs captants du Val de Saône : expérimentations avec bougies poreuses et modélisation avec « AgriFlux »*, *Ingénieries-EAT*, n° 35, p. 3-17.
- ZHENG, C., 1990, *MT3D – A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reaction of contaminants in groundwater system*, Reference Manual, S.S. Papadopoulos & Associates Inc.