MODELISATION DU TRANSFERT DE L'EAU ET DES NITRATES DANS LA ZONE NON SATUREE
(Application au bassin versant de Houlle et Moulle)

SERHAL Hani [1], MAILLOT Henri [2], BERNARD Daniel [3], [4] BASTIN Sabine
[1] Polytech'Lille - Lille - France ; [2] Polytech'Lille ; [3] Agence de l'eau Artois-Picardie – Douai – France,
[4] Bureau d'études SOREG – Famars – France

INTRODUCTION :

souterraines ont une importance essentielle dans le Nord de la France. En effet, dans le bassin Artois-Picardie, 1500 installations de captage ont prélevé 330 millions de m3 d'eau souterraine en 1995 (Agence de l'eau Artois-Picardie) Ce volume couvre 96 % de la consommation domestique des habitants de la région.La majeure partie de l'eau souterraine provient de la nappe de la craie. Cette ressource disponible en quantité suffisante Les nappes est déjà dégradée par endroits. L'un des principaux polluants est le nitrate. La contamination par les nitrates est le principal impact environnemental de l'agriculture sur la qualité de l'eau souterraine. Les nitrates sont une forme soluble de l'azote qui est généralement mal adsorbé par les particules du sol et qui peut donc filtrer dans les eaux souterraines s'il n'est pas assimilé par les végétaux. La zone d'étude comprend 55 communes (figure1), qui constituent le bassin versant d'Houlle Moulle, où se trouvent quinze captages qui alimentent en eau potable la communauté urbaine de Dunkerque.Ces captages sont gérés par la Lyonnaise des eaux, et repartis le long de la bordure Ouest du Marais Audomarois sur les communes de Houlle, Moulle, Eperlecques et Bayenghem-Les-Eperlecques
Le contexte géologique de la zone d'étude comprend les grandes formations suivantes (d'après BURGEAP 1995):

- A l'Ouest, la série crayeuse comprenant à la base les formations de la craie marneuse du Cénomanien et du Turonien inférieur, surmontées par de la craie franche du Turonien Supérieur et du Sénonien ; l'ensemble a un pendage général vers l'Est-Nord-Est ; la série crayeuse repose sur les formations jurassiques qui affleurent à l'Ouest.
- A partir du méridien de Saint-Omer et en allant vers l'Est, la série crayeuse s'ennoie sous la formation tertiaires comprenant à la base l'Argile de Louvil, surmontée par la Sable d'Ostricourt, eux-mêmes surmontés par l'Argile de Flandres ;
- L'ensemble disparaît au niveau du marais Audomarois sous les formations quartenaires alluviales.

La nappe la plus exploitée est celle de la craie Séno-Turonienne, l'eau coule du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Cette nappe est libre dans la partie Ouest et centre du bassin où la craie affleurent, et devient captive à l'Est où la craie s'ennoie sous les formations de l'Argile de Louvil.

RESULTATS DES SUIVIS IN SITU :

Afin d'apprécier les évolutions de multiples facteurs agissant plus ou moins directement sur la qualité des eaux souterraines, plusieurs suivis ont été réalisés :

1- SUIVI AGRONOMIQUE :

L'activité agricole est très développée. Au cours des dernières décennies, la hausse de la productivité agricole s'est accompagnée d'une forte augmentation des fertilisations azotées qui a entraîné l'augmentation des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines. Les pratiques culturales, comme le retournement des prairies, l'enfouissement des résidus de récoltes ou l'assolement, ont pu avoir une influence sur la dynamique spatiale et temporelle des flux de nitrates percolant vers la nappe.

Le suivi agronomique est la phase essentielle de connaissance des intrants du système.Les pratiques culturales et les fertilisations sont des facteurs qui influencent directement les quantités de matière disponible pour la percolation de pollutions diffuses azotées. Ces deux facteurs sont liées aux activités humaines, et traduisent le potentiel des matériaux polluants qui sera introduit dans le milieu. La LYONNAISE DES EAUX, assistée par la Chambre d'Agriculture du Pas de Calais, a réalisé une enquête sur les historiques culturaux.Ces enquêtes nous donnent une idée sur l'assolement, le rendement, l'apport d'engrais minéral, le type et la quantité d'amendement organique, et le devenir des résidus de récoltes.Les principales cultures non pérennes sont le blé, le lin, les betteraves sucrières. La monoculture est généralement constituée prairies, qui sont cultivées pour le pâturage. L'influence du paramètre humain se traduit le plus souvent par la différence de la date et de quantité d'engrais utilisée.

2-CAMPAGNE DE SONDAGES :

L'opération a été confiée à l'entreprise de sondages PONTIGNAC, 19 sondages ont été réalisés. L'analyse des profils du sol nous montre une hétérogénéité spatiale importante.

On constate que tous les profils du sol commencent par une couche de terre végétale, et se terminent dans la couche crayeuse, mais les couches intermédiaires varient énormément d'un sondage à l'autre.

La couverture pédologique des parcelles correspond à un sol de texture très hétérogène qui varie entre sol limoneux, limono-argilo-sableux et limono-argileux.

Une prise d'échantillon de sol a été réalisée régulièrement chaque 50 cm, et les teneurs en nitrates, ammonium, chlorures et bore sont mesurées (Institut Pasteur de Lille). On constate, d'après l'analyse des profils azotés, que la concentration en nitrate varie beaucoup dans les deux premiers mètres et commence à se stabiliser en se rapprochant de la zone saturée. Le seuil de potabilité en nitrates (50 mg/l) est largement dépassé dans des certains endroits.

3-SUIVI DE CONCENTRATION EN NITRATES DANS L'EAU SOUTERRAINE :

Les analyses physico-chimiques de l'eau de captages ont été réalisées soit par l'institut pasteur de Lille, soit à l'usine de Houlle. On constate une forte concentration en nitrates sur certains captages, et une forte variation d'un mois à un autre. Durant la période de forte recharge de la nappe, l'augmentation de la concentration est liée au flux d'azote qui vient de la zone non saturée par effet de fissural, tandis que durant la période d'été, les nitrates qui arrivent au captages, sont ceux qui se trouvent déjà dans la nappe.

DESCRIPTION DU MODELE UTILISE DANS LA MODELISATION (AGRIFLUX) :

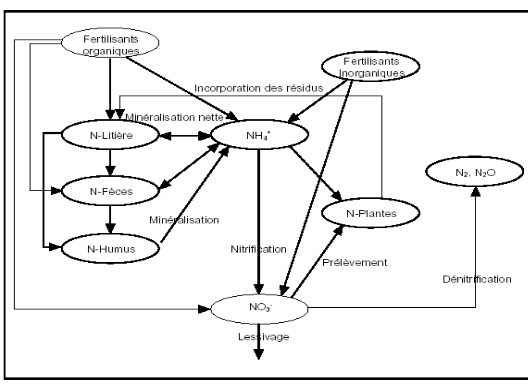

Figure 1 : Cycle de l'azote

Le logiciel AgriFlux (Banton et al., 1993) est un modèle d'évaluation environnementale développé spécifiquement pour la gestion des pollutions diffuses d'origine agricole. Basé sur une approche en différences finies par réservoirs pour l'évaluation quantitative des flux d'eau, de nitrates et de pesticides parvenant à la nappe, AgriFlux est un modèle mécaniste stochastique alliant la représentation conceptuelle des mécanismes avec la variabilité spatiale des processus et des paramètres

Les bilans d'eau, d'azote sont calculés dans le modèle par des modules indépendants. Les différents modules sont Hydrique (Hydriflux), Nitreux (Nitriflux).

Module HydriFlux

Le module HydriFlux calcule les flux d'eau ruisselés et lessivés entre les couches de sol en considérant l'infiltration, le ruissellement, la percolation, le prélèvement d'eau par la culture et l'évaporation selon un pas de temps journalier et en tenant compte des caractéristiques hydrauliques de chaque couche (conductivité hydraulique, porosité, capacité au champ, point de flétrissement.

Module NitriFlux

Le module NitriFlux simule selon la même base journalière la transformation et le transport de l'azote dans le sol. Les processus biochimiques simulés par NitriFlux dépendent de la température et de la teneur en eau de chaque couche.Les apports extérieurs (fertilisation, incorporation des résidus de récolte) et les pertes (prélèvement par les plantes, lessivage,

dénitrification) sont également simulés.Les nitrates sont considérés comme le seul composé azoté pouvant migrer avec l'eau sous forme dissoute et sont transférés au travers des différentes couches avec l'eau.

Le modèle AgriFlux permet ainsi d'évaluer quantitativement les flux journaliers de nitrates associés au ruissellement et au lessivage sur une parcelle ou sur toute zone dont la nature du sol et l'assolement sont connus.

L'approche adoptée (fig.2) est basée sur la représentation du cycle de l'azote généralement admise (ex.Johnsson et al.,1987).

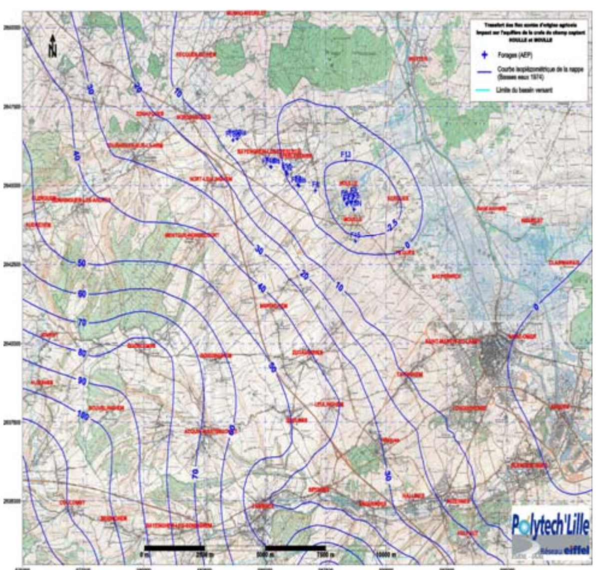

Figure 2 : Bassin versant de Houlle et Moulle (zone d'étude)

1- APPLICATION D'AGRIFLUX :

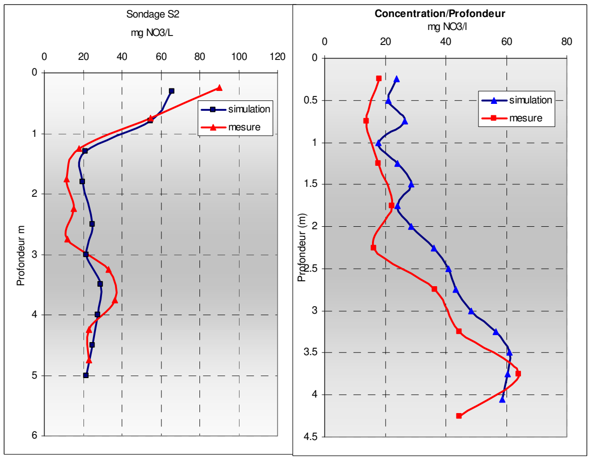

Figure 3 : Comparaison entre les profils réels et simulés

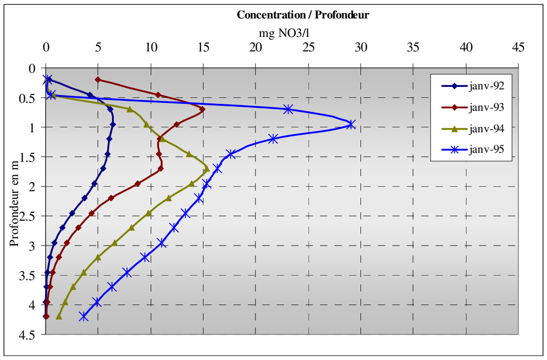

Figure 4 : Evolution de la concentration en nitrates

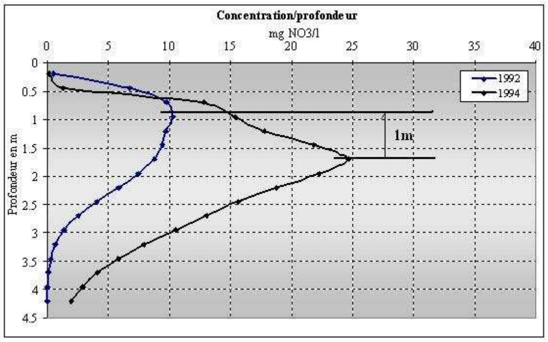

Figure 5 : Vitesse de la migration des nitrates

Agriflux est appliqué dans la zone racinaire et la partie supérieure de la zone non saturée.
L'azote organique qui se trouve initialement dans le sol, est considéré sous forme humus.
Les azotes minéraux (nitrates et ammonium) sont considérés comme négligeables au début de la simulation, car cette forme d'azote n'est pas stable.
Les caractéristiques des cultures sont fournies par les agriculteurs volontaires qui ont accepté à nous fournir les historiques culturaux (depuis 1992 jusqu'à 2002)

2-MODELISATION A L'ECHELLE PARCELLAIRE :

Avant la réalisation de la simulation à l'échelle du bassin versant, il était nécessaire d'effectuer des simulations à l'échelle parcellaire, dans les parcelles sondées, afin de paramétrer et caller le modèle.
Les différentes données nécessaires au fonctionnement du modèle portent sur les caractéristiques du sol, les conditions climatiques, les cultures, les fertilisations et le cycle de l'azote. Dans la mesure de possible, les données introduites dans le modèle sont des données mesurées. Les valeurs affectées aux paramètres non mesurés proviennent de recherches bibliographiques (Soltner, 1996, Brisson et al., 1998).

Les données climatiques : précipitations, température et l'évapotranspiration sont des données nécessaires pour la modélisation par Agriflux. La hauteur d'eau lessivée, ainsi que le cycle de l'azote (les activités bactériennes) varient avec ces paramètres. Plusieurs stations météorologiques sont situées autour de la zone d'étude. La plus proche est celle de Saint Omer, qui se trouve au sud de la zone ; elle indique une précipitation annuelle moyenne de 843 mm, et une évapotranspiration de 634 mm.

Les caractéristiques hydrologiques du sol sont déterminées à partir de leur classe texturale (Rawls ; Brakensiek, 1989).
La vitesse de transfert dépend de la porosité et de la pluie efficace (Chiesi, 1993).

Le rapport C/N du sol, mésuré par AGREN S.A., varie entre 8 et 9. La dynamique de processus biochimiques dans le sol est controlée par le carbone (Hanks and Ritchies 1991). Comme celui-ci diminue avec la profondeur (Lafrance et Banton, 1995), on considère qu'au-delà d'un certain profondeur, les nitrates ne subissent aucun transformation.

L'utilisation du modèle Agriflux donne des résultats satisfaisantes : les concentrations en nitrates simulées sont du même ordre de grandeurs que les valeurs mesurées (figure 3).

La figure 4 nous montre l'évolution du profil azoté en fonction du temps, on trouve qu'il y a une augmentation plus ou moins stable de 1 mg/l/an à la sortie (à 4 m de profondeur).

La vitesse moyenne de la migration des nitrates varie entre 0.4 et 0.7 m/an. Le pic de nitrates a traversé 1 m dans deux ans (figure 5).

3-MODELISATION A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT :

Plusieurs données sont nécessaires pour démarrer la simulation globale à l'échelle du bassin versant:
1) le profil du sol à chaque point du bassin (épaisseur du recouvrement et de la zone non saturée).
2) Activités agricoles sur tous les parcelles du bassin (rotation, quantité, type et date de l'application des engrais).
3) Données climatiques (température, précipitation et évapotranspiration).

Profil du sol

La carte géologique fait apparaître plusieurs formations dans le sous-sol, constitué en grande majorité par un complexe de craie du Turonien et du Sénonien.

Dans des certaines zones, le sol disparaît et la craie affleure. En superposant la carte IGN et la carte géologique, on peut déterminer le niveau de la craie dans les zones d'affleurement. En faisant la différence entre la topographie et le niveau de la craie, et à partir les sondages géologiques et des couches géologiques déjà réalisées, on peut déduire l'épaisseur de la couche de recouvrement des différents points du bassin.

ACTIVITES AGRICOLES :

RGA (Recensement Général Agricole) :

Ces données indiquent le type et la superficie de chaque culture, ainsi que toutes les informations concernant les activités d'élevages par commune.

La plus grande surface agricole est consacrée aux grandes cultures, qui occupent les terrains plats, tandis que les STH (superficie toujours en herbe) sont localisées aux bordures des plateaux où les terrains sont pentus. La surface des prairies est de l'ordre de 28 % du surface total agricole.Le blé tendre est la culture dominante, il occupe 40% des surfaces agricoles, tandis que les cultures de printemps comme les betteraves présentent 7% des surfaces agricoles D'après l'analyse des ces données, on peut classifier les communes en 4 types selon les cultures pratiquées :

1. Communes d'élevages : Ce sont des communes à forte activités d'élevages, où on trouve des grandes surfaces cultivées en maïs fourrages.
2. Communes de polycultures : Dans ces communes on trouve surtout les cultures industrielles comme les betteraves à sucre.
3. Communes de culture légumière : Dans ces communes, les légumes frais comme les petits pois et les haricots verts, occupent des grandes surfaces.
4. Communes de culture maraîchage : Essentiellement dans la région du marais Audomarois, où les cultures de poireau et chou-fleur sont abondantes.

RESULTATS DE LA SIMULATION : La concentration en nitrates dans l'eau lessivée atteint le maximum entre les années 60 et 80, pour prendre une valeur moyenne de 112 mg NO3/l (figure 7), une légère baisse apparaît après l'année 80, et cela due au changement des pratiques culturaux et le mise en place de rotation. Une diminution considérable apparaît après les années 90. Dans la rotation utilisé dans les communes de polyculture, on constate une légère baisse dans la concentration en nitrates dans l'eau lessivée, et cela due à la culture des betteraves qui absorbe plus des nitrates et moins de l'eau.

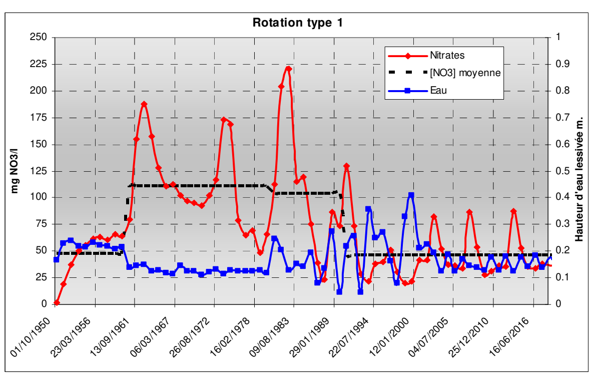

Figure 7 : Concentration en nitrates et hauteur d'eau lessivée

La figure suivante 8 montre les concentrations en nitrates dans l'eau qui entre dans la zone non saturée de la craie sous les parcelles agricole entre les années 1985 et 1990. Une amélioration dans la qualité de l'eau apparaît après l'année 1990 (2002). Par contre on constate que les zones polluées gagnent de surface et cela est dû au temps de transfert de nitrates.

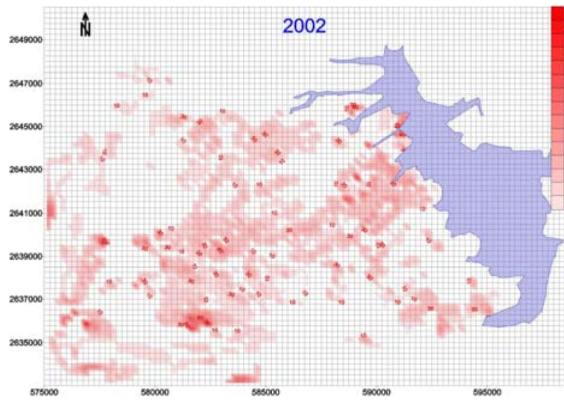

Figure 8 : [NO3] dans l'eau entrant dans la craie (2002)

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES :

- La modélisation et l'expérimentation sont complémentaire : sans l'effort de la théorisation que constitue la modélisation, l'expérimentation a un intérêt limité, dans la mesure où on ne peut pas comprendre et donc extrapoler à des situations comparables. Inversement, sans l'expérimentation le paramétrage du modèle est impossible.- Les enquêtes menées dans le secteur d'Houlle Moulle et dans des autres secteurs montre que l'augmentation de fertilisation ne provoque pas une augmentation de rendement. La plante prend son besoin en azote et l'excès reste dans le sol et risque d'être entraîné par lessivage. La surfertilisation provoque ainsi une augmentation de lessivage des nitrates, et la fertilisation raisonnée la diminue.

- La modélisation nous montre que la vitesse de migration des nitrates est entre 0.4 et 0.7 m/an, et cela varie avec les précipitations et la texture du sol. Les anciennes études (Vachier et al., 1987 - Wellings et Bell, 1980).

- Dans la partie Est de la zone d'étude, la nappe n'est pas trop profonde, le temps de transfert de nitrates est court, d'où la nécessité de bien contrôler les intrants dans cette zone, surtout en amont immédiat des captages. La mise en place de programme Ferti-Mieux, c'est-à-dire le contrôle des intrants en fonction de besoin de chaque type de culture, et l'utilisation du CIPAN (culture intermédiaire piège à nitrate), peut entraîner une amélioration dans la qualité d'eau qui alimente la nappe.

- L'étape suivante sera le couplage d'Agriflux avec un autre modèle hydrodynamique de transport en zone saturée, ce qui permettra de former un outil complet d'évaluation fiable de risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates d'origine agricole.

BIBLIOGRAPHIE :

1. AZOTE ET AGRICULTURE de A à Z , 2000 : Brochure réalisé par l'agence de l'eau Artois Picardie et la chambre d'agriculture de Nord, du Pas-de-Calais, de la somme et de l'Aisne.
2. BANTON O., LAROCQUE M., SURATEAU F., VILLENEUVE J.P. (1993) : AgriFlux : Logiciel d'évaluation des pertes environnementales des contaminants agricoles. – Manuel d'usager. Rapport scientifique INRS-eau no. R380. Ste-Foy, Qc.
3. BURGEAP, 1995: Etude globale sur les ressources en eau souterraines dans le bassin versant de l'AA.
4. CHAMBRE D'AGRICULTURE DU PAS-DE-CALAIS : Fertiliser avec l'engrais du ferme, 2001.