

Évaluer le transfert des produits phytosanitaires entre zones d'application et eaux souterraines

Application « Phyto'Scope » au Val d'Orléans

■ A. CHASLES¹, M. DEDEWANOU², D. MINC³, H. NOËL², E. OPPENEAU⁴, R. TALVA³

Mots-clés : produits phytosanitaires, modélisation, transfert, sol, sous-sol, agriculture

Keywords: pesticides, establishment of a model, soil, subsoil, transfert, agriculture

Introduction

Contexte et finalité

Dans le cadre de sa politique de sécurisation de l'alimentation en eau potable (AEP) de l'agglomération orléanaise, la ville d'Orléans a souhaité disposer d'un outil prédictif des risques potentiels de contamination des captages situés dans le Val d'Orléans par le transfert des pesticides d'origine agricole à travers le sol et le sous-sol. Pour ce faire, la ville d'Orléans a diligenté l'étude présentée et résumée dans cet article, qui porte sur le territoire du Val d'Orléans correspondant au périmètre de protection éloignée (PPE) des principaux captages alimentant une partie de l'agglomération.

L'outil permet de corréler les quantités de pesticides épandues aux différents points du bassin d'alimentation des captages avec les teneurs mesurées aux captages. La modélisation fine des transferts devrait permettre de mieux évaluer la contribution des pratiques agricoles actuelles et futures sur la qualité de la ressource en eau, d'appuyer la communication sur ce sujet sensible auprès des différents acteurs locaux (collectivités, usagers, professionnels agricoles...), de cibler les secteurs les plus sensibles et de proposer des actions pilotes sur ces secteurs.

NB : même si la qualité des eaux des captages du Val d'Orléans est fortement influencée par les apports issus de la Loire (cf. hydrogéologie *infra*), la pression

agricole sur l'aire d'alimentation des captages représente potentiellement un risque pour la sécurisation de l'alimentation en eau potable de l'agglomération orléanaise. Les eaux de Loire sont pratiquement dépourvues des molécules tracées, elles interviennent par dilution, facteur intégré dans les modélisations. L'étude apporte donc, par ses conclusions, des éléments quantitatifs qui restent fiables pour la prévision et la gestion des risques de contamination par les produits phytosanitaires.

Méthode

La méthode a consisté à simuler les transferts d'eau et de produits phytosanitaires depuis la surface des sols agricoles vers les trois captages implantés dans le Val d'Orléans et destinés à l'alimentation en eau potable. Dans ce but, un outil a été construit à partir du couplage entre un modèle de transfert pédologique et un modèle de transfert hydrogéologique (*figure 1*).

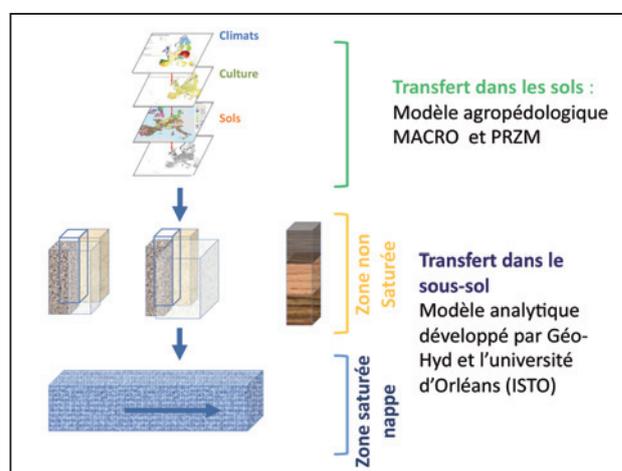


Figure 1. Schéma de principe du couplage des modèles

¹ Orléanaise des Eaux/Lyonnaise des Eaux - 26, rue de la Chaude-Tuile - 45000 Orléans.

² Géo-Hyd Antea Group - Parc technologique du Clos du Moulin - 101, rue Jacques-Charles - 45160 Olivet.

³ Footways - 10, avenue Buffon - 45071 Orléans cedex 2.

⁴ Lyonnaise des Eaux - Tour CB21 - 16, place de l'Iris - 92040 Paris La Défense.

1. Le Val d'Orléans

Le Val d'Orléans appartient à la plaine alluviale de la Loire située au sud-est d'Orléans. Sa superficie est d'environ 180 km², pour une longueur de 35 km d'est en ouest de la boucle de Guilly à la confluence du Loiret avec la Loire, et une largeur maximale de 7 km dans sa partie centrale. Les sinuosités de la Loire et le plateau de Sologne en constituent respectivement les limites nord et sud (figure 2). Le secteur amont (qui correspond à la zone d'étude) est plutôt rural alors que le secteur aval (partie rivière Loiret) est plutôt urbanisé. Les pentes sont peu prononcées (environ 1 %) et l'altitude moyenne est d'une centaine de mètres.

Le Val d'Orléans est essentiellement drainé par la rivière du Dhuy (environ 30 km) qui se jette dans le Loiret à Orléans, en aval de la source du Bouillon. Le Loiret prend sa source au niveau des résurgences karstiques du Parc floral qui sont les émergences principales des pertes de la Loire (cf. *infra*), localisées essentiellement en amont au niveau de la commune de Jargeau.

C'est sur le territoire du périmètre de protection éloignée que l'étude a été réalisée.

1.1. Contexte géologique et hydrogéologique

Le sous-sol du Val d'Orléans est composé d'une succession de dépôts sédimentaires. La craie blanche

à silex du crétacé et les formations détritiques de l'éocène en constituent la base. Elles sont surmontées par les calcaires de Beauce (tertiaire), eux-mêmes coiffés par les marnes et sables du burdigalien et enfin par les alluvions quaternaires de la Loire.

Les formations géologiques des alluvions de la Loire et des calcaires de Beauce correspondent aux formations aquifères. C'est l'aquifère des calcaires de Beauce qui est capté par les forages du Val d'Orléans pour l'alimentation en eau potable de la Ville d'Orléans. La nappe des alluvions de la Loire est semi-captive. Elle est contenue dans un aquifère composé de graviers et de sables grossiers, son caractère semi-captif est dû à la présence éparse de lentilles d'argile à son sommet. À l'exception des secteurs limitrophes à la Loire, la nappe des alluvions est essentiellement alimentée par les précipitations sur l'impluvium.

La nappe des calcaires de Beauce est le plus souvent semi-captive à captive et devient libre au droit des captages du Val d'Orléans. À l'est, les lentilles marneuses du burdigalien forment un écran protecteur pour la nappe, tandis qu'à l'ouest l'aquifère est en lien direct avec la nappe des alluvions sus-jacentes. Au cours du temps, les eaux d'infiltration acides ont conduit à la formation de cavités importantes au sein du massif calcaire et à la création d'un réseau karstique très développé entre les pertes de Loire, localisées au nord-est du Val (Jargeau) et les sources émergentes situées au sud-ouest (Parc floral d'Orléans

et lit du Loiret). Des traçages ont également mis en évidence que les eaux du bassin de l'Anche, en rive droite de la Loire, participent également à l'apport en eau du système karstique du Val d'Orléans (figures 3 et 4).

Au final, l'alimentation en eau de l'aquifère de Beauce sous le Val d'Orléans est issue essentiellement, de la Loire par des pertes dans son lit, de l'impluvium du Val d'Orléans (~ 284 km²) via la nappe alluviale (infiltration des précipitations sur le Val d'Orléans) et des eaux de ruissellement du bassin de l'Anche en rive droite de la Loire,

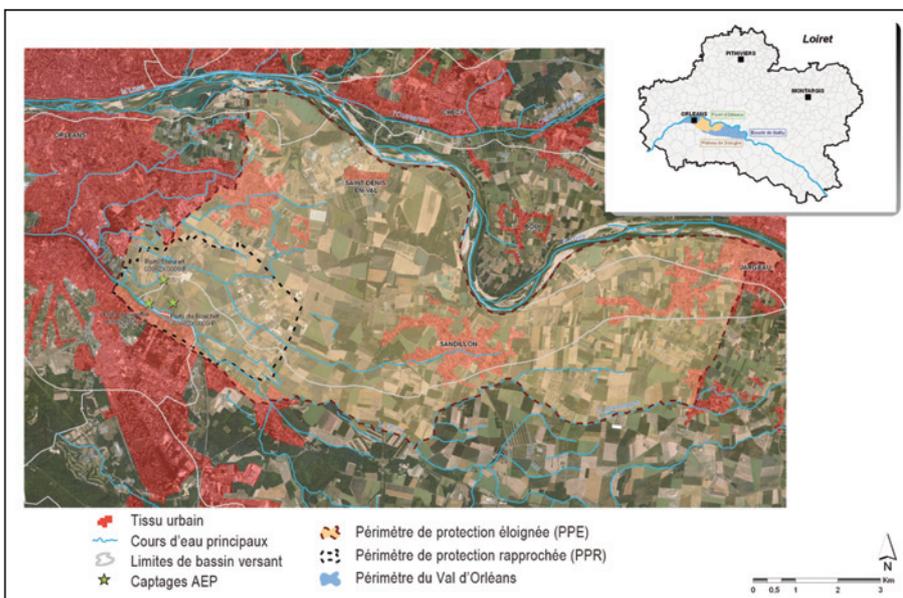


Figure 2. Localisation des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable (AEP) du Val d'Orléans

par des écoulements karstiques (~ 60 km²).

Le bilan hydrologique a été réalisé à plusieurs reprises par différents auteurs [CHÉRY, 1983 ; LIVROZET, 1984 ; GONZALÈS, 1991 ; LEPILLER, 2006 ; JOZJA et LELONG, 2008 ; BINET et GUTIERREZ, 2010]. L'ensemble des résultats atteste que les pertes de la Loire participent en grande majorité à l'alimentation en eau du bassin versant souterrain. La part des apports dus aux pertes de la Loire est estimée à 85 % de l'apport global en eau du système, l'apport instantané dû aux pertes étant estimé au minimum à 5 m³/s et à 12 m³/s pour une année moyenne [BINET et GUTIERREZ, 2010].

Les apports à la nappe du Val d'Orléans provenant des calcaires de Beauce sous la forêt d'Orléans et sous la Sologne n'excèdent pas 0,03 m³/s.

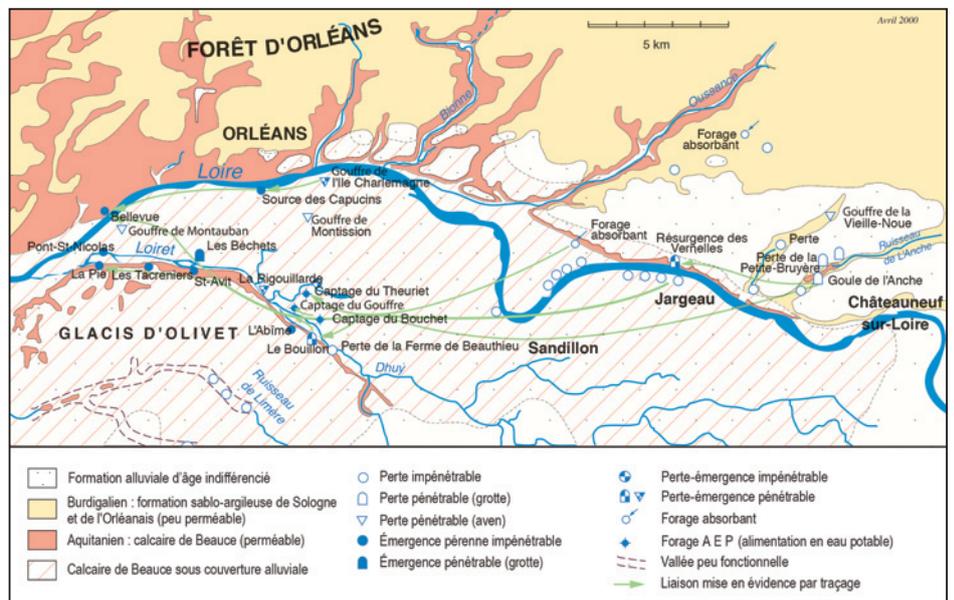
La hauteur d'eau des précipitations efficaces s'infiltrant dans les bassins du Loiret et de l'Anche est évaluée à 0,191 m/an par JOIGNEAUX et coll. [2008]. Elle est modélisée en moyenne à 0,100 m/an sur l'impluvium du Val dans le cadre de notre étude (modélisation « sol » sur 10 ans de chroniques météorologiques).

Les différents écarts constatés dans la littérature scientifique sur la quantification des apports en eau de la nappe du Val ont permis d'évaluer les incertitudes sur les teneurs des produits phytosanitaires modélisés aux captages.

1.2. Données climatiques et agropédologiques

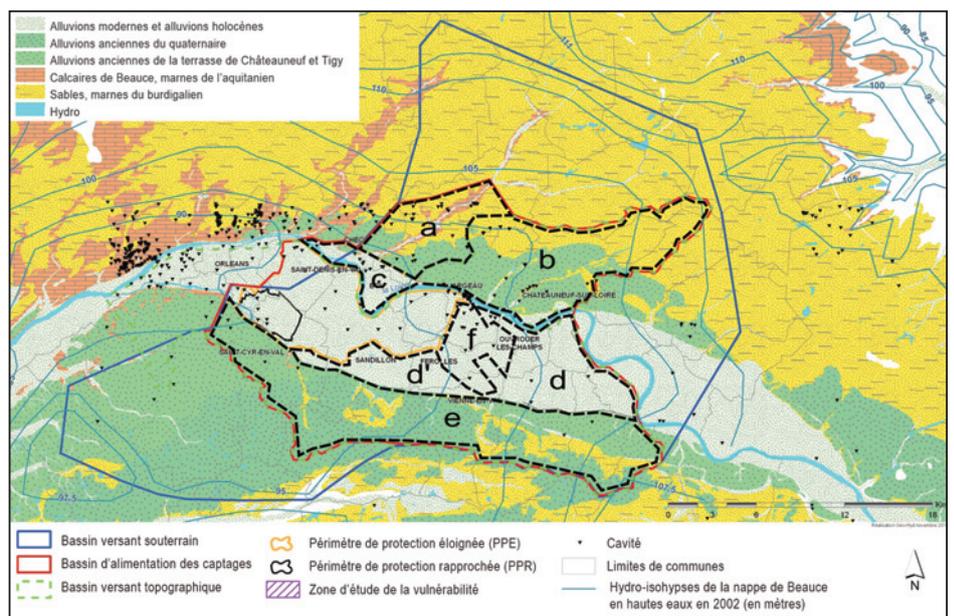
1.2.1. Données météorologiques

La description du climat a été réalisée sur la base de données météorologiques représentatives du territoire d'étude et issues de stations Météo France. Ces données ont été acquises sur une période de 10 ans



[Lepiller, 2006]

Figure 3. Carte des circulations karstiques dans le Val d'Orléans



[Géo-Hyd, 2012]

Figure 4. Sectorisation du bassin d'alimentation des captages du Val d'Orléans

(du 1^{er} janvier 2002 au 31 décembre 2011) à un pas de temps journalier.

1.2.2. Données pédologiques

C'est au sein de la couche pédologique qu'intervient l'essentiel des phénomènes déterminant les transferts d'eau et de produits phytosanitaires qui quittent les parcelles agricoles. La méthodologie développée dans le cadre du projet Footprint et utilisée par Footways permet de trier tous les sols agricoles d'Europe en 264 classes, appelées footprint soil types (FST). Dans le

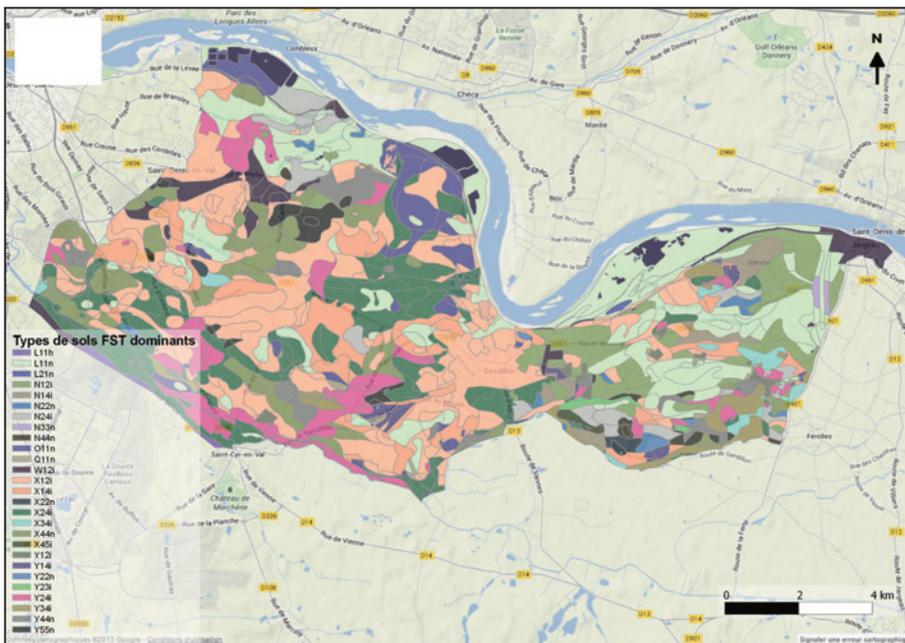
cadre du projet Phyto'Scope, la carte du Val d'Orléans à l'échelle du 1/50 000 de la chambre d'agriculture du Loiret a été utilisée, complétée par la carte des sols du Loiret à l'échelle du 1/250 000 lorsque les données issues de la carte au 1/50 000 n'étaient pas suffisantes. Sur le Val d'Orléans, 710 unités cartographiques de sol ont été identifiées (figure 5), correspondant à 32 types de sol FST différents.

1.2.3. Données sur l'occupation des sols et la distribution spatiale des cultures

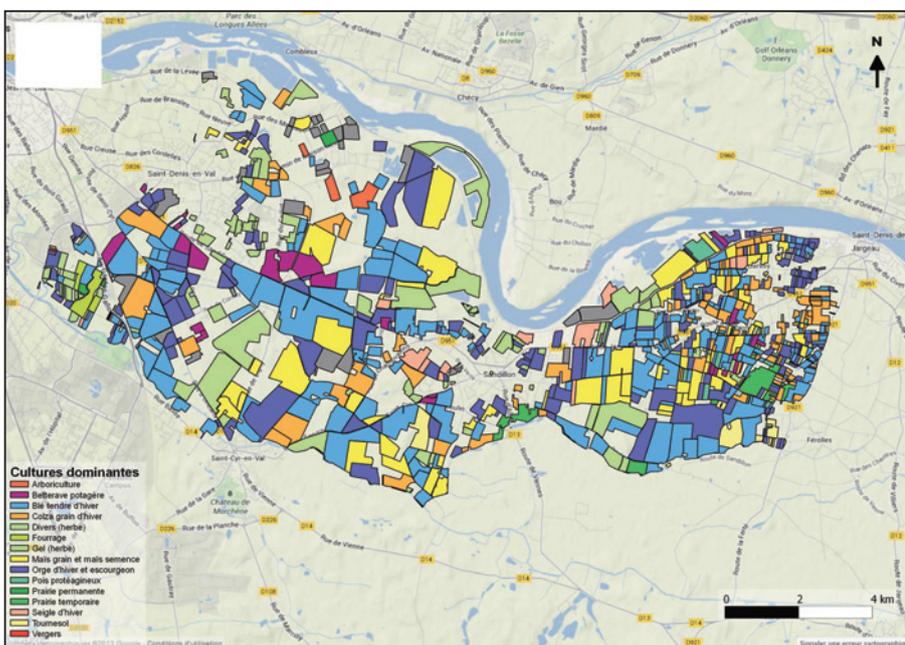
Les données utilisées pour représenter les cultures sur le territoire proviennent du Registre parcellaire graphique (RPG) de 2010 sur le département du Loiret (figure 6).

Les données statistiques publiées par la chambre d'agriculture du Loiret et par le site Agreste du ministère de l'Agriculture ainsi que par les données obtenues lors des enquêtes agricoles réalisées dans le cadre de l'étude BAC ont permis de réaliser un traitement statistique des données cartographiques du RPG 2010. Ces données ont ensuite été associées aux bases de données Footways afin de paramétrer le modèle.

Le Val d'Orléans présente une surface agricole utile (SAU) élevée, dominée par les grandes cultures (céréales et oléagineux : blé tendre d'hiver 37 % SAU, maïs 16 %, orge d'hiver et escourgeon 16 %, colza grain d'hiver 12 %). On note également la présence notable de cultures légumières de plein champ (betterave potagère 2 % SAU, pomme de terre 1 %...).



Source : Footways
Figure 5. Types de sols FST dominants sur le Val d'Orléans



Source : Footways
Figure 6. Carte des cultures dominantes sur le Val d'Orléans d'après le Registre parcellaire graphique 2010

1.3. Données relatives aux molécules appliquées

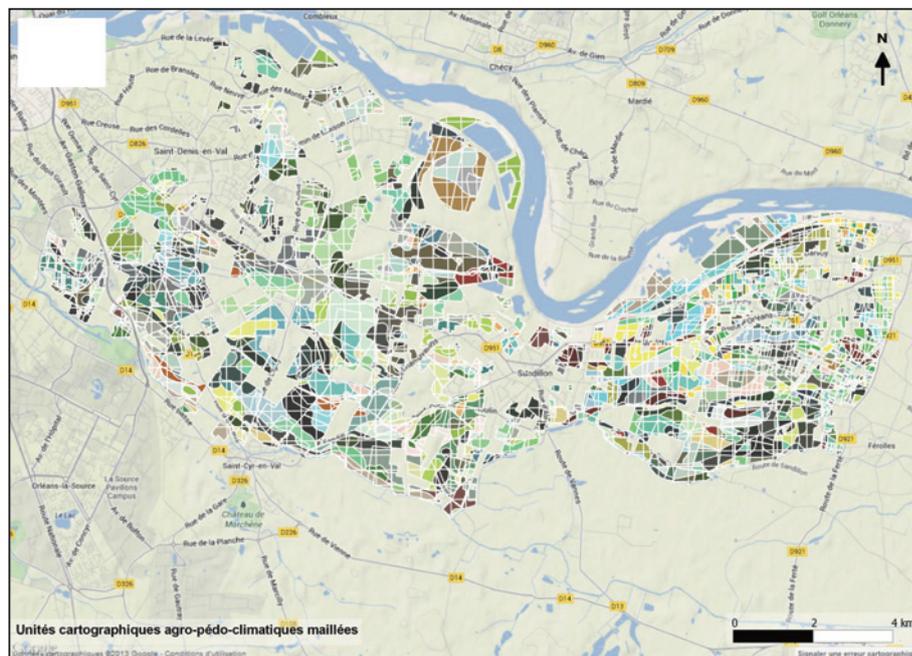
1.3.1. Propriétés des molécules

Les propriétés physico-chimiques et environnementales des substances actives modélisées (durées de demi-vie, constantes de rétention et exposants de Freundlich) ont été obtenues à l'aide de la Footprint PPDB, base de données sur les propriétés des pesticides issue du projet européen.

1.3.2. Scénarios d'application phytosanitaire

Dans le cadre de l'étude BAC, les itinéraires généraux des pratiques culturales, principalement sur les

grandes cultures et à la marge sur maraîchage, ont été étudiés et pris en compte, représentant un total de 152 parcelles. Les différentes pratiques phytosanitaires examinées sur une même culture ont été pondérées selon leur surface afin de constituer un itinéraire technique statistique. Celui-ci est appliqué à l'identique partout où la culture est présente dans le Val d'Orléans. Ces scénarios ont permis d'appréhender les pratiques phytosanitaires de 20 cultures différentes pour 121 substances appliquées (dont certaines sur plusieurs cultures).



Source : Footways

Figure 7. Carte des unités cartographiques agropédo-climatiques maillées

2. Transferts dans les sols

Le modèle Macro est utilisé dans le domaine de la recherche sur les transferts de produits phytosanitaires dans les sols et dans le domaine de l'évaluation des risques pour l'homologation bénéficiant d'un historique de plus de 20 ans. Il possède une bonne capacité de prédiction dans tous les types de sols, depuis les sols sableux où les écoulements préférentiels sont généralement limités, jusqu'aux sols agricoles les plus argileux, sujets à des transferts rapides et importants par écoulements préférentiels. Ce modèle a ainsi été paramétré selon la méthodologie développée pour le projet européen Footprint.

2.1. Traitement des résultats

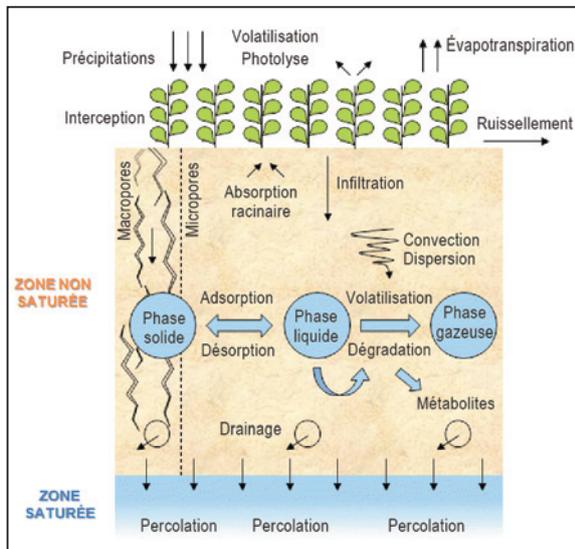
Dans le cadre spécifique du projet Phyto'Scope, des calculs supplémentaires ont été réalisés afin de fournir les résultats de cette modélisation comme données d'entrée des modèles hydrogéologiques au travers un maillage régulier composé de mailles de 250×250 m sur l'ensemble de la zone de modélisation. Footways a donc transmis à Géo-Hyd des fichiers contenant les chroniques journalières de flux d'eau et de molécules phytosanitaires pour toutes les mailles hydrogéologiques d'après les combinaisons agropédo-climatiques qui composent chacune d'elles (figure 7).

2.2. Bilan de la modélisation des transferts dans les sols

À partir des scénarios d'application phytosanitaire et de la répartition des cultures sur le Val d'Orléans, il est possible de quantifier les transferts de substances actives appliquées et de les cartographier. Les hypothèses retenues pour cette étude nous amènent à la conclusion d'une application totale de molécules phytosanitaires d'environ 4 t par an, toutes cultures confondues (hors horticulture et cultures sous serre). Par leur présence prédominante sur le territoire ainsi que par leurs itinéraires techniques en traitement phytosanitaire, les grandes cultures représentent plus des trois quarts des quantités totales appliquées de molécules phytosanitaires. Les molécules les plus appliquées sur le Val d'Orléans sont des herbicides : l'isoproturon sur les céréales d'hiver, le S-métolachlore sur le maïs, puis le glyphosate.

Le bilan des quantités d'eau percolée selon la modélisation dans la couche de sol montre que les sols en amont du bassin versant sont de nature plus infiltrante qu'à proximité des captages.

De nombreux processus interviennent dans le devenir des molécules phytosanitaires sur et dans les sols, pendant et après leur application (figure 8).



Source : Footways

Figure 8. Processus impliqués dans le transfert des molécules phytosanitaires dans les sols

Ainsi, le bilan des quantités obtenues par modélisation des transferts dans les sols indique que sur les 4 t appliquées en moyenne annuelle, 43,3 kg de molécules phytosanitaires sont transférées par percolation (figure 9), soit environ 1 % des quantités appliquées. Les autres transferts représentent en moyenne annuelle 34,3 kg et alimentent les eaux de surface par le réseau de drainage agricole, par des écoulements hypodermiques et par ruissellement et érosion. La

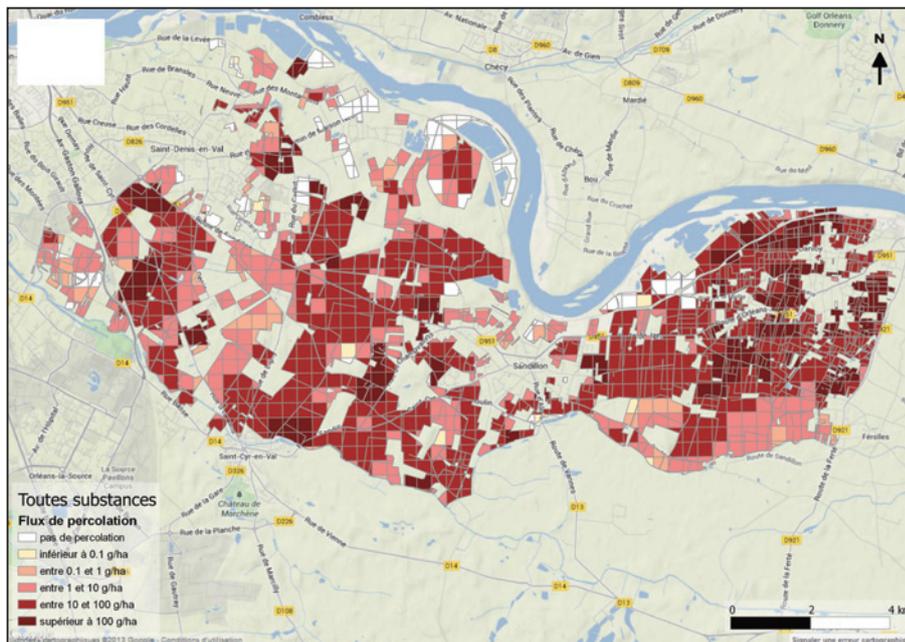
différence entre quantités appliquées et quantités transférées est liée aux phénomènes de rétention (dans les plantes et dans le sol) et de dégradation chimique.

Pour l'étape suivante du projet, les chroniques journalières de transfert dans les sols de dix molécules ont été couplées aux modèles hydrogéologiques. La sélection de ces molécules a été réalisée en concertation entre Orléanaise des Eaux, Footways et Géo-Hyd. Le choix s'est porté sur trois métabolites de dégradation dont les flux par percolation sont les plus importants, puis sur les sept substances actives « parentes » les plus transférées par percolation. Les dix molécules sélectionnées qui découlent de ces applications représentent plus de 75 % des quantités totales transférées par percolation sur le Val d'Orléans (figure 10).

Cette sélection correspond à l'application de huit substances actives distinctes (métazachlore, acétochlore, chlortoluron, clopyralide, bénomaxor, isoproturon, prosulfuron et flutriafol) qui représentent environ 25 % des quantités totales appliquées sur le Val d'Orléans.

Le métazachlore est un herbicide appliqué fin août/début septembre sur le colza entre 400 et 800 g/ha. L'acétochlore est un herbicide appliqué au

mois d'avril sur le maïs-grain à 1 600 g/ha. Le chlortoluron est un herbicide appliqué en octobre sur le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver entre 1 400 et 1 600 g/ha. Le clopyralide est un herbicide appliqué au printemps sur les céréales entre 50 et 100 g/ha. Le bénomaxor est un herbicide appliqué sur le maïs-grain entre mars et mai autour de 50 g/ha. L'isoproturon est un herbicide appliqué en automne puis en fin d'hiver sur le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver



Source : Footways

Figure 9. Carte des flux moyens annuels de la somme de toutes les molécules phytosanitaires modélisées, transférées par percolation à la base du profil de sol

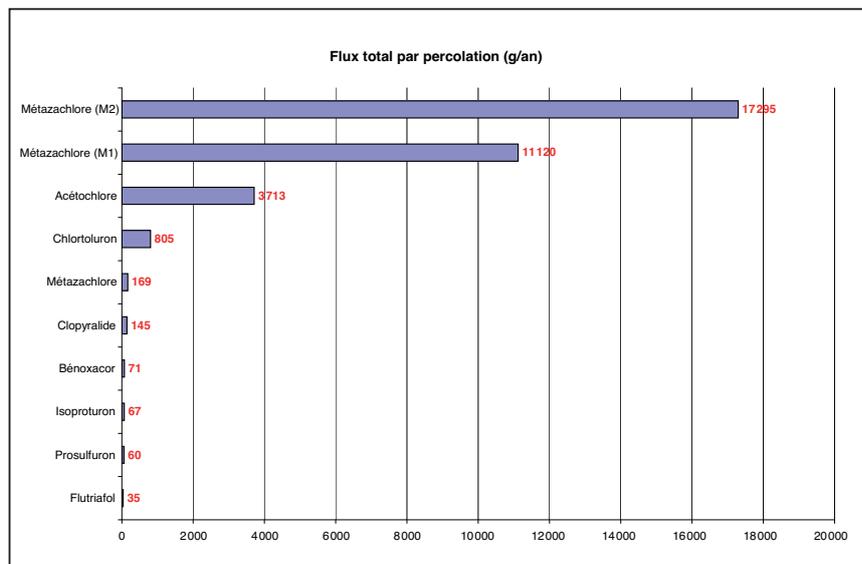


Figure 10. Bilan des quantités moyennes annuelles transférées par percolation sur le Val d'Orléans (des dix molécules sélectionnées pour la suite du couplage)

entre 720 et 1 000 g/ha. Le prosulfuron est un herbicide appliqué au printemps sur le maïs-grain entre 5 et 10 g/ha. Le flutriafol est un fongicide appliqué fin mai puis mi-juillet sur la betterave potagère à 125 g/ha.

3. Transferts dans le sous-sol

Le modèle utilisé dans cette étude a été récemment développé au sein de la société Géo-Hyd. La validation de ce modèle, dit « analytique », a été réalisée à l'aide des modèles élaborés dits « numériques » que sont Modflow et Hydrus. Si ces derniers sont reconnus et considérés comme « robustes » par la communauté scientifique, leur mise en œuvre reste complexe et nécessite l'utilisation d'applicatifs spécifiques. L'intérêt du modèle qui est appliqué ici réside dans la relative simplicité de sa mise en œuvre (utilisation d'un système d'information géographique [SIG] et d'un tableur). Ainsi, la trame du modèle appliqué au Val d'Orléans pourra être réutilisée facilement pour tester la contribution de nouvelles pratiques agricoles.

Le développement du modèle appliqué au Val d'Orléans est le fruit des travaux de thèse de M. Dedewanou [DEDEWANOU, 2014 ; DEDEWANOU *et al.*, 2013] doctorante CIFRE Géo-Hyd, université d'Orléans (Institut des sciences de la terre d'Orléans, ISTO).

3.1. Principe du modèle

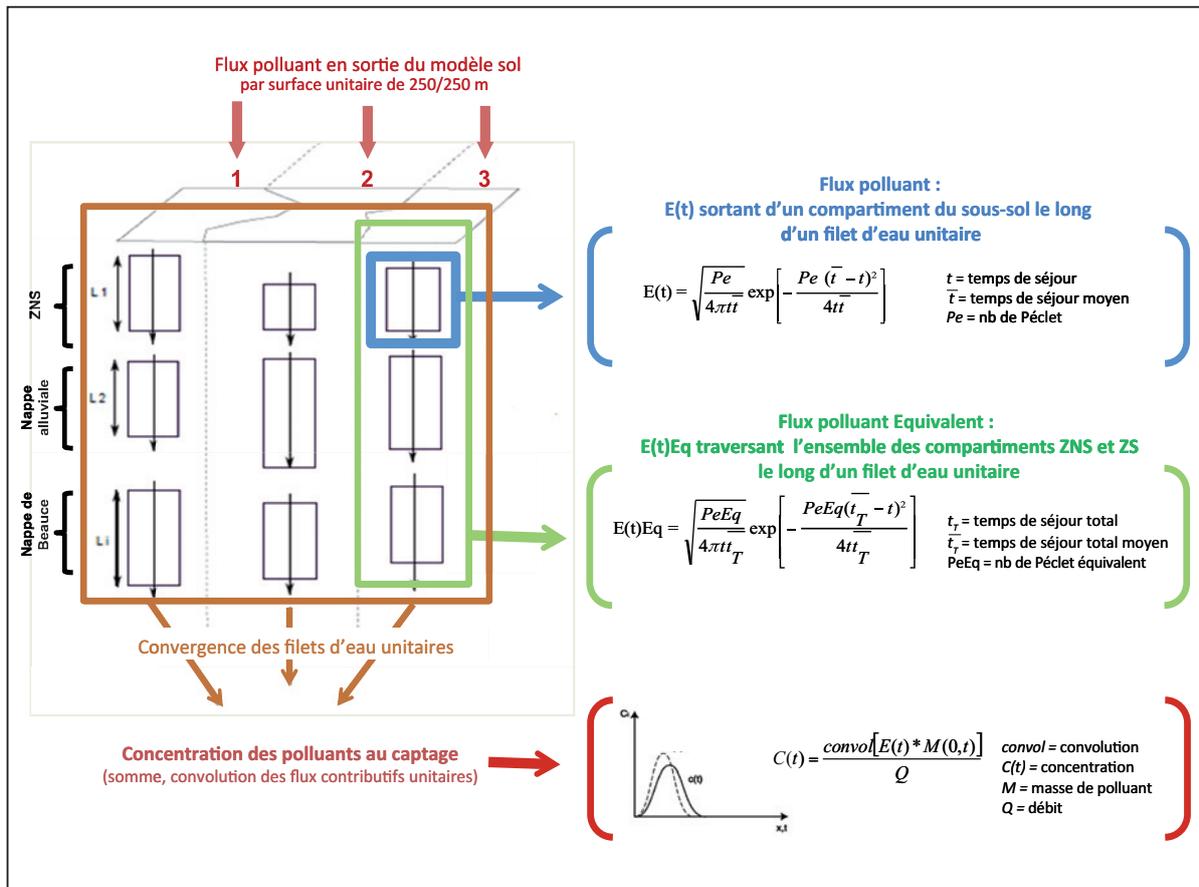
La méthode consiste à décomposer le bassin d'alimentation en n filets d'écoulement parallèles qui vont converger vers les captages. On considère l'écoulement d'abord vertical dans la zone non saturée (ZNS), puis subhorizontal dans la nappe d'eau souterraine (zone saturée, ZS). Chaque filet d'eau est associé à une surface unitaire (maille carrée de 250/250 m), d'où sortent les flux quantifiés à l'aide du modèle sol.

Dans chaque compartiment ZNS et ZS le long d'un filet d'eau, il est possible d'écrire une équation de transport des polluants dans les réservoirs géologiques (équation d'advection/dispersion, *figure 11*). La résolution de cette équation simplifiée sur les différents compartiments du sous-sol du Val d'Orléans a été validée par des tests comparatifs avec les modèles numériques Modflow (pour la ZS) et Hydrus (pour la ZNS). Une équation est ensuite établie par filet d'écoulement qui permet de calculer, pour chacune des surfaces unitaires du bassin, l'évolution des concentrations de produits phytosanitaires aux captages.

Au final, le modèle appliqué au Val d'Orléans permet de déterminer l'évolution des concentrations de molécules phytosanitaires aux captages à partir des flux imposés sortant des sols (flux sous-racinaires issus de la modélisation « sol »), de cartographier la distribution des temps de séjour des molécules dans le sous-sol et ses différents compartiments (ZNS, ZS), d'identifier les surfaces unitaires qui participent aux principaux dépassements de seuils de concentration observés au captage.

3.2. Approximation du modèle sous-sol

Le développement d'un modèle analytique assez simple pour être facilement réutilisable nécessite quelques hypothèses simplificatrices.



ZNS : zone non saturée ; ZS : zone saturée.

Figure 11. Schéma conceptuel et équations utilisées dans le modèle analytique appliqué sur le Val d'Orléans. Péclet (Pe) = (vitesse × distance) / dispersion (modifié de Dedewanou [2014] et Dedewanou et coll. [2013])

La première hypothèse porte sur l'évolution des molécules dans le sous-sol : les molécules phytosanitaires sont considérées comme non réactives avec la matrice minérale du sous-sol (non-rétention) et ne se dégradent pas. C'est ce qui est généralement admis dans les modèles hydrogéologiques. Par conséquent, le modèle aura tendance à surestimer les teneurs en molécules aux captages (situation du pire).

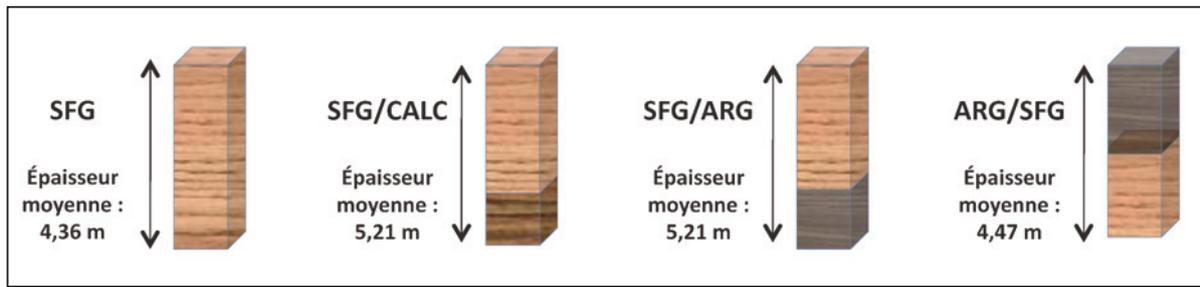
La deuxième, sur l'écoulement des eaux, permet de considérer la vitesse moyenne des molécules comme constante (filet d'écoulement permanent). Ce n'est pas le cas dans la réalité où les écoulements se font en fonction de l'évolution des précipitations, de l'évapotranspiration et de l'état de la réserve hydrique des sols (écoulement en régime transitoire). Cette approximation a essentiellement un impact sur les temps de transfert des molécules dans le sous-sol. Dans l'ensemble, les biais par rapport à la réalité n'excèdent pas 1 à 2 mois.

Enfin, la dernière hypothèse, sur les échanges entre les mailles du modèle, suppose qu'il n'y a pas d'échange latéral entre les différentes mailles du modèle. Les modèles numériques 2D et 3D permettent la prise en compte de ces échanges mais sont complexes à mettre en œuvre à l'échelle d'un bassin versant.

3.3. Construction du modèle sur le Val d'Orléans

3.3.1. Caractérisation de la zone non saturée (ZNS)

La caractérisation de la ZNS consiste à recenser les différents types de lithologie du Val d'Orléans à partir des logs stratigraphiques disponibles dans la banque de données du sous-sol (BSS), à identifier des profils types et à définir leurs paramètres hydrodynamiques. Au total, 336 logs stratigraphiques extraits de la BSS ont été examinés et quatre profils « types » ont été établis (figure 12).



SFG : sables fins à grossiers ; SFG/CACL : sables fins à grossiers et calcaires ; SFG/ARG : sables fins à grossiers et argiles ; ARG/SFG : argiles et sables fins à grossiers.

Figure 12. Profils types de la zone non saturée présents dans le Val d'Orléans

La spatialisation des profils montre que l'essentiel du bassin est composé d'une ZNS de type sables fins à grossiers (SFG > 50 % du bassin). Les épaisseurs moyennes de la ZNS calculées sur le Val d'Orléans se situent entre 4,5 m et 5,2 m (différence entre le modèle numérique de terrain [MNT] et la piézométrie des alluvions de la Loire) (figure 13).

Les paramètres nécessaires à l'application des équations du modèle analytique dans la ZNS ont été établis sur la base du travail bibliographique effectué dans le cadre de la thèse de Myriam Dedewanou (tableau I). C'est dans les profils sableux (SFG) que les vitesses de percolation sont les plus importantes, alors que les paramètres de dispersion y sont les plus faibles. Le profil SFG de la ZNS étant le plus représenté sur le bassin du Val d'Orléans, cela souligne que le « système ZNS » est globalement réactif et que les flux sous-racinaires sont rapidement transférés vers le toit de la nappe.

Profils Types ZNS	Teneur en eau (θ) (%)	Vitesse de percolation (m/s)	Coefficient de dispersion longitudinale (m)
SFG	0,33	2,3-10 ⁻⁷	0,40
SFG/CALC	0,40	1,0-10 ⁻⁸	0,40
SFG/ARG	0,50	3,5-10 ⁻⁹	0,50
ARG/SFG	0,50	3,5-10 ⁻⁹	0,50

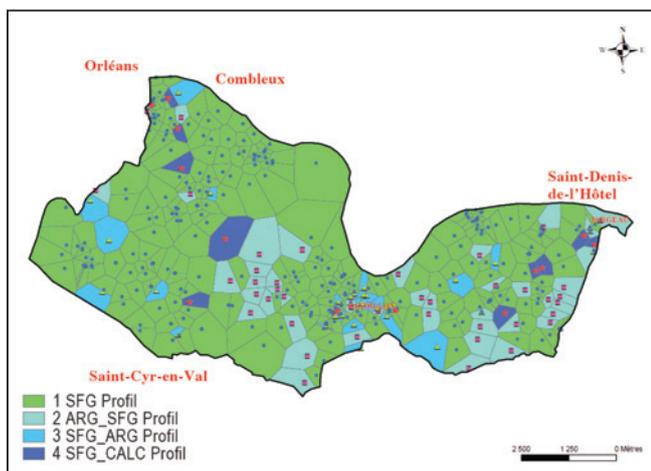
Se reporter à la figure 12 pour la signification des symboles.

Tableau I. Paramètres hydrodynamiques des profils types de la zone non saturée (ZNS) issus de bibliographies [Dedewanou, 2014]

3.3.2. Caractérisation de la zone saturée (ZS)

La détermination des vitesses et des directions d'écoulement dans un système aquifère aussi complexe que celui du Val d'Orléans n'a pu être établie qu'à l'aide d'une modélisation numérique réalisée sous Modflow. L'essentiel des données d'entrée nécessaires à la modélisation de la nappe sous Modflow est issu du travail réalisé en 2011 par l'université d'Orléans (Isto) dans le cadre du projet Icere [BINET *et al.*, 2011]. Ces éléments comprennent : la morphologie du système aquifère (les alluvions de la Loire, les sables et argiles du burdigalien et les calcaires de Beauce) ; les charges hydrauliques (hauteur d'eau) appliquées aux limites du système établies à l'aide des cartes piézométriques basses eaux élaborées par Desprez en 1966 [DESPREZ, 1967] ; la recharge du système (bilan P-ETP sur l'impluvium du Val, recharge à partir des pertes en Loire au nord-est du bassin, au niveau de Jargeau⁵).

Le calage a consisté à ajuster les données pas à pas jusqu'à ce que le modèle reproduise le mieux possible



SFG : sables fins à grossiers ; SFG_CACL : sables fins à grossiers et calcaires ; SFG_ARG : sables fins à grossiers et argiles ; ARG_SFG : argiles et sables fins à grossiers.

Figure 13. Spatialisation des différents types de zones non saturées (ZNS) (points BSS) définis sur le Val d'Orléans

⁵ Bilan hydrologique basé sur la différence entre les précipitations P et l'évapotranspiration ETP.

Zone saturée	Vitesse (m/s)	Porosité [%]	Coefficient de dispersion longitudinale [m]
Alluvions	$9 \cdot 10^{-8}$ à $6 \cdot 10^{-4}$	0,15	20,00
Calcaires matrice	$8 \cdot 10^{-8}$ à $2 \cdot 10^{-2}$	0,30	2,50
Calcaires karst		1,00	38,00

Tableau II. Paramètres hydrodynamiques de la zone saturée ZS

les charges hydrauliques observées sur le terrain et déduites des cartes piézométriques de référence de DESPREZ, [1967]. Il aboutit à une corrélation presque parfaite entre les valeurs calculées et les valeurs observées ($R^2 > 0,93$). Elle démontre que le modèle des vitesses d'écoulement des nappes du Val d'Orléans reproduit très correctement la réalité.

Les vitesses d'écoulement dans les deux aquifères du Val d'Orléans (alluvions de la Loire et calcaire de Beauce) ont été calculées à l'aide de la modélisation Modflow. Les paramètres de dispersion sont eux, comme dans la ZNS, extraits de la bibliographie (tableau II).

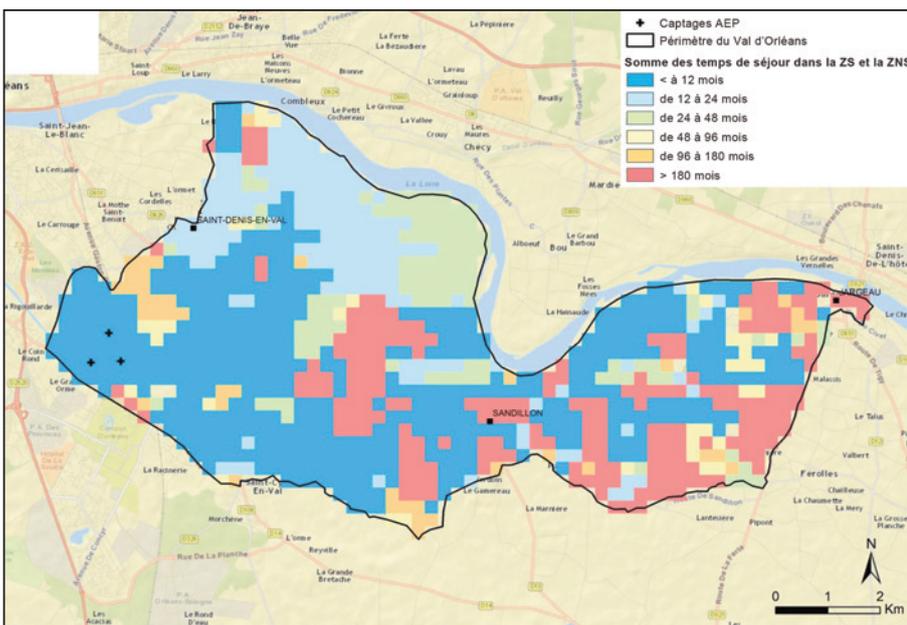
Les vitesses modélisées se situent aux alentours de 10^{-7} m/s dans les matrices calcaires et alluvionnaires. Elles sont évidemment beaucoup plus rapides aux alentours des drains karstiques et sont de l'ordre de 10^{-2} m/s.

3.4. Résultats de la modélisation du transfert dans le sous-sol

3.4.1. Temps de séjour des molécules dans le sous-sol

La figure 14 est la somme des temps de séjour dans la ZNS avec celles de la ZS (nappe alluviale + nappe de Beauce). Elle permet, en tout point du bassin, de prédire combien de temps va mettre une molécule entrant dans le sous-sol pour arriver aux captages du Val d'Orléans.

Globalement, les temps de séjour observés dans le sous-sol restent en majorité inférieurs à 1 an (46 % de la surface totale), ce qui souligne la forte réactivité du système. On remarque toutefois des secteurs où les temps de séjour peuvent être significativement supérieurs. En effet, sur la partie du bassin située entre Saint-Cyr-en-Val et la Loire (~ 10 % de la surface totale), les temps de séjour sont compris entre 1 et 4 ans. C'est essentiellement le temps de transport dans la nappe de Beauce qui allonge les temps de séjour. De même, sur des secteurs où les temps de séjour étaient déjà importants dans la ZNS (> 8 ans). C'est en particulier le cas dans la moitié est du territoire, à l'amont du bassin. On soulignera que ce n'est pas la distance au captage qui en est responsable, mais essentiellement les temps de transit dans la ZNS.



AEP : alimentation en eau potable ; ZNS : zone non saturée ; ZS : zone saturée.

Figure 14. Répartition des temps de séjours totaux dans le sous-sol sur le Val d'Orléans

Ces observations sont à mettre en parallèle avec les résultats de la modélisation pédologique sur l'infiltration de l'eau dans les sols et montrent que les sols en amont du bassin sont de nature plus infiltrante. Dans une moindre mesure, c'est également le cas au nord-est du bassin entre Saint-Cyr-en-Val et la Loire. Par conséquent, on peut considérer que la nature infiltrante des sols dans ces secteurs est en partie compensée par des temps de transfert relativement longs dans le sous-sol (> 1 an). Les risques de transferts rapides des molécules phytosanitaires sont donc tamponnés dans ces secteurs.

3.4.2. Concentration aux captages et origines des principaux dépassements

La moyenne des teneurs aux captages de la somme des dix molécules modélisées est largement en dessous du seuil réglementaire de potabilité des eaux brutes destinées à l'AEP (2 µg/L par molécule et 5 µg/L pour la somme des molécules). C'est également le cas, si l'on observe l'évolution mensuelle durant ces 10 dernières années et ce, quelle que soit l'incertitude appliquée. Ces résultats globaux sont cohérents avec ce qui est effectivement mesuré dans les eaux captées pour l'AEP dans le Val d'Orléans où les molécules dosées ne dépassent que rarement les limites de quantification analytiques des laboratoires. Cependant, regardées individuellement, les deux premières molécules notées métazachlore M1 et M2 ont des concentrations moyennes modélisées supérieures à 0,05 µg/L aux captages (figure 15). Ces valeurs moyennes dépassent les 0,1 µg/L pour le métabolite M2 du métazachlore, si l'on considère l'incertitude la plus haute du modèle. Ce constat est accentué quand on considère l'évolution des teneurs mensuelles. C'est particulièrement le cas pour le métabolite M2 dont les valeurs au-dessus de 0,1 µg/L sont fréquentes selon les hypothèses moyennes et hautes des incertitudes (figure 16).

Les métabolites M1 et M2 du métazachlore ne sont pas analysés dans le cadre du contrôle de la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eaux potables (AEP). Au vu des résultats, un dosage des deux métabolites a été réalisé sur deux échantillons ponctuels prélevés en novembre 2013 aux captages du Val d'Orléans et au Bouillon du Parc floral (principal exutoire de la nappe des calcaires de Beauce dans le Val d'Orléans). Les analyses confirment sans équivoque la présence de ces métabolites à des taux supérieurs à 0,1 µg/L. Les teneurs sont d'environ 0,20 µg/L pour le métazachlore M1 et de 0,16 µg/L pour le M2. Les valeurs mesurées et calculées sont comparables, ce qui confirme la cohérence de la modélisation sol/sous-sol réalisée dans le cadre de cette étude.

Le modèle du sous-sol permet également d'identifier les surfaces contributives au dépassement d'un seuil de concentration pris arbitrairement. Par exemple, la figure 17 identifie les surfaces contributrices au dé-

passement du seuil de 0,1 µg/L du métazachlore M2 calculés aux captages. Celles-ci ne représentent qu'environ 20 % des surfaces sur lesquelles est appliqué le métazachlore (herbicide utilisé pour le colza). Les secteurs les plus contributifs restent situés à proximité des captages dans le périmètre de protection rapprochée des captages et au nord immédiat de la commune de Saint-Cyr-en-Val. Ces secteurs contribuent à plus de 75 % aux concentrations observées aux captages (classe rouge > 75 %). On voit donc que ce type d'approche peut permettre d'identifier les secteurs où d'éventuelles actions agro-environnementales pourraient être fixées en priorité.

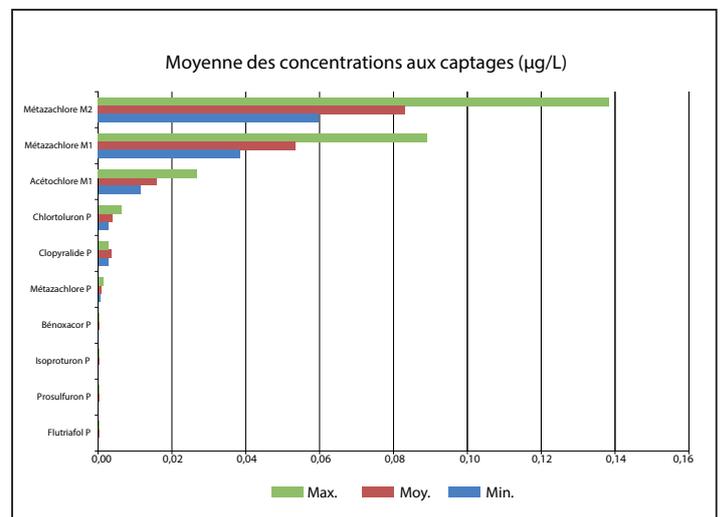


Figure 15. Moyennes des concentrations des principales molécules calculées à l'aide de la modélisation des transferts dans le sous-sol

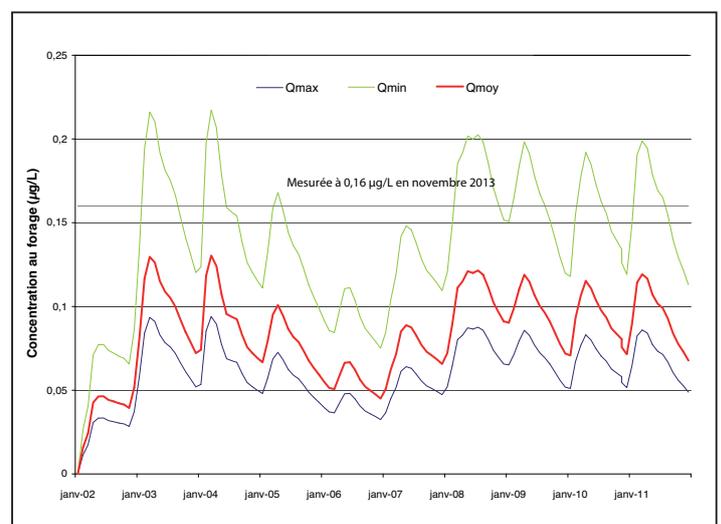


Figure 16. Concentrations mensuelles modélisées aux captages du métazachlore M2 au cours des 10 dernières années

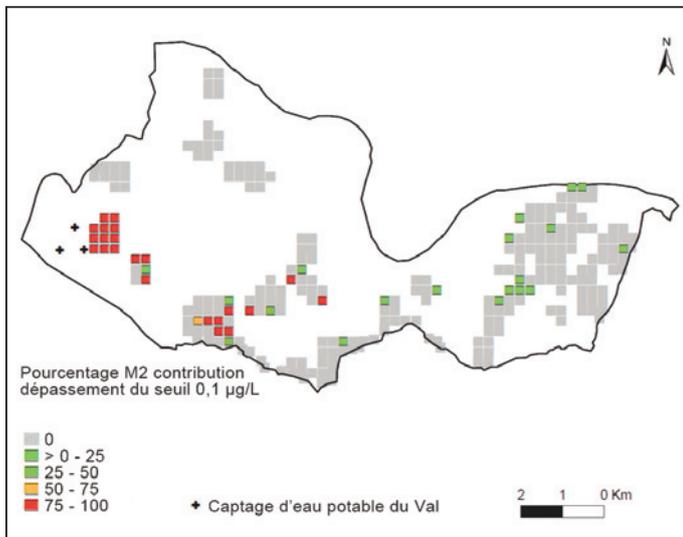


Figure 17. Identification des surfaces unitaires du bassin contribuant aux concentrations supérieures à 0,1 µg/L en métazachlore M2 calculées aux captages du Val d'Orléans

Conclusion générale et perspectives

L'étude des transferts des produits phytosanitaires appliqués sur le Val d'Orléans a été réalisée en associant des modèles spécifiques aux différents compartiments que sont le sol et le sous-sol. Les transferts dans les sols ont été calculés à l'aide du modèle Macro paramétré selon l'expertise de la société Footways. Les transferts dans le sous-sol ont été calculés à l'aide d'un modèle spécifique développé au sein de la société Géo-Hyd en collaboration avec l'université d'Orléans. Le couplage des deux modèles a été rendu possible par la mise en place d'un format d'échange commun aux deux modèles.

Il est dès aujourd'hui possible de tester et d'optimiser l'efficacité d'éventuelles mesures agro-environnementales sur les concentrations de molécules arrivant aux captages du Val d'Orléans. Il est prévu de réaliser une simulation, courant 2015, après discussion avec la ville d'Orléans, pour définir les nouveaux scénarios de pratiques phytosanitaires.

Sur près de 4 t de molécules phytosanitaires appliquées sur le Val d'Orléans, environ 40 kg (1 %) sont retrouvés dans les eaux de percolation. Sur les 121 substances appliquées, dix molécules sont prépondérantes et représentent 75 % des quantités estimées par le modèle.

La modélisation a permis de produire une cartographie des temps de séjour des molécules dans le sous-sol qui permet, en tout point du bassin, de prédire combien de temps va mettre une molécule entrant dans le sous-sol pour arriver aux captages du Val d'Orléans.

Les résultats sont conformes à ce qui est régulièrement mesuré aux captages du Val d'Orléans. La somme des concentrations des dix molécules reste inférieure aux seuils de qualité des eaux brutes destinées à l'AEP qui sont de 2 µg/L par molécule et de 5 µg/L pour la somme des molécules mesurées. Cependant, l'évolution des concentrations mensuelles des molécules, calculées individuellement, montre des concentrations régulières supérieures à 0,1 µg/L pour deux molécules issues de la dégradation du métazachlore (herbicide couramment utilisé pour la culture du colza). Ces deux métabolites de dégradation, métazachlore M1 et M2, ne sont pas mesurés dans le cadre du contrôle de surveillance des eaux destinées à l'alimentation en eau potable.

Enfin, la modélisation a permis d'identifier les secteurs sur lesquels l'application du métazachlore est contributive aux concentrations supérieures à 0,1 µg/L calculé aux captages. Ces secteurs sont essentiellement localisés à proximité du captage, dans le périmètre de protection rapprochée, et au nord immédiat de la commune de Saint-Cyr-en-Val.

Ces conclusions sont intrinsèquement liées aux hypothèses de travail retenues et sont susceptibles d'évoluer selon les changements de pratiques culturales.

Il est possible d'utiliser ce modèle, non plus pour constater des pollutions, mais pour les prévoir. En ce sens, une des suites du projet pourrait avoir pour objet de cartographier, sur l'ensemble du Val d'Orléans, la sensibilité du système à supporter les traitements au métazachlore sur les cultures de colza ou à simuler la substitution du métazachlore par d'autres produits. Un système cultural optimisé pour limiter le transfert de produits phytosanitaires dans la nappe et bâti avec le concours des exploitants agricoles du Val d'Orléans pourrait ainsi voir le jour.

Bibliographie

- BINET S., AUTERIVES C., CHARLIER J.B. (2011) : *ICERE – Impact des changements environnementaux sur la ressource en eau : Construction d'un modèle hydrogéologique d'étiage sur le Val d'Orléans*. Rapport final. 47 pp.
- BINET S., GUTIERREZ A. (2010) : « La Loire souterraine : circulations karstiques dans le Val d'Orléans ». *Geosciences* ; 12 : 42-53.
- CARSEL R.F., IMHOFF J.C., HUMMEL P.R., CHEPLICK J.M., DONIGIAN A.S. JR. (2003) : *PRZM-3, A model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones: Users Manual for Release 3.12*. Center for exposure assessment modeling (CEAM), US Environmental Protection Agency (USEPA), Athens, GA, États-Unis.
- CHERY J.-L. (1983) : *Étude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (la Loire) – Le système des calcaires de Beauce sous le val d'Orléans*. Thèse, Université d'Orléans.
- DEDEWANOU M. (2014) : *Vulnérabilité spécifique des forages vis-à-vis des phytosanitaires : Modélisation analytique et application au Val d'Orléans*. Thèse, université d'Orléans, Institut des sciences de la terre d'Orléans (ISTO).
- DEDEWANOU M., BINET S., ROUET J.L., COQUET Y., BRUAND A., NOEL H. (2013) : « A process-based modeling approach to assess borehole vulnerability ». *International Interdisciplinary Conference on Land Use and Water Quality: Reducing Effects of Agriculture*. 2013 June 10-13 ; The Hague, The Netherlands.
- DESPREZ N. (1967) : *Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans*. Rapport BRGM D-SGR-67-A2.
- DOUZALS J.-P. (2011) : « Drift mitigation techniques for surface water protection: another French paradox? » *Euraqua-PEER conference*. 2011 October 26-28, Montpellier, France [poster presentation].
- DUBUS I.G., REICHENBERGER S., ALLIER D., AZIMONTI G., BACH M., BARRIUSO E., et al. (2010) : *Footprint – Functional tools for pesticide risk assessment and management*. www.eu-footprint.org. Final report of the EU project Footprint (SSPI-CT-2005-022704), 221 p.
- FEMVTF (2001) : JONES R.L., RUSSELL L.J. & M.H. (eds.), *FIFRA Environmental Model Validation Task Force: Final Report*. USEPA MRID 45433201, 768 p.
- FOCUS (2000) : « FOCUS groundwater scenarios in the EU review of active substances ». Report of the FOCUS Groundwater Scenarios Workgroup, EC Document Reference SANCO/321/2000 rev.2, 202 p.
- FOCUS (2001) : « FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC ». Report of the FOCUS Working Group on Surface Water Scenarios, EC Document Reference SANCO/4802/2001 rev.2., 245 p.
- GEO-HYD (2012) : *Étude BAC : étude du bassin d'alimentation des captages du Val*. 165 pp.
- GONZALÈZ R. (1991) : *Étude de l'organisation et évaluation des échanges entre la Loire moyenne et l'aquifère des calcaires de Beauce*. Thèse. Sciences de la terre, spéc. hydrogéologie, Université d'Orléans. 201 p.
- JOIGNEAUX E., ALBERIC P., PAUWELS H., GUTIERREZ A., BARAN N., BINET S. (2008) : « The impacts of climate change on point groundwater discharge in a fluvio-karst landscape. » *EG-A* ; n° 12076.
- KLEIN M. (2007) : « Long-term surface water simulations with STEPS-1-2-3-4 ». *Proceedings of the 13th Symposium on Pesticide Chemistry*, 2007 Sept. 03-06 ; Piacenza, Italie. p. 950-957.
- LARSO M., JARVIS N. (2003) : MACRO5.0. « A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description ». *Emergo 2003:6*, Studies in the Biogeophysical Environment, SLU, Dept. Soil Sci., Uppsala, 47 pp.
- LARSO M., ROULIER S., STENEMO F., KASTEEL R., JARVIS N. (2005) : « An improved dualpermeability model of water flow and solute transport in the vadose zone ». *Vadose Zone Journal* ; 4 : 398-406.
- LARSSON M.H., JARVIS N.J. (1999) : « Evaluation of a dual-porosity model to predict field-scale solute transport in a macroporous soil ». *J. Hydrol.* ; 215 : 153-171.
- LE BORGNE F., TREUIL M., JORON J.-L., LEPILLER M. (2005) : « Méthode de sondage géochimique des aquifères à l'aide des lanthanides naturels et de leurs complexes EDTA : Cas des aquifères alluvial et karstique du Val d'Orléans ». *Bulletin de la Société Géologique de France* ; 176 : 513-529.
- LELONG F., NEVILA JOZJA (2008) : « Fonctionnement du système karstique du Val d'Orléans: les acquis, les interrogations ». CFH – Colloque hydrogéologie karst au travers des travaux de Michel Lepiller. Journées techniques du Comité français de l'Association internationale des hydrogéologues 16-17 mai 2008. École polytechnique, université d'Orléans.
- LEPILLER M. (2006) : « Val d'Orléans ». In : J.-C. Roux (ed.), *Aquifère et eaux souterraines en France*, BRGM, pp. 200-214.
- LIVROZET E. (1984) : *Influence des apports de la Loire sur la qualité bactériologique et chimique de l'aquifère karstique du val d'Orléans*. Thèse, université d'Orléans.
- MARTIN J.C., TOURLIERE B., CHEVRIER B., LEROY M.L. (2007) : « Élaboration d'un document cartographique d'orientation pour la recherche de zones potentiellement favorables à l'implantation d'un centre de stockage de déchets ultimes (CSDU) dans le département du Loiret ». *BRGM n° RP-55707-FR*, 77 pp.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE (2008). *E-phy – Le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages des matières fertilisantes et des supports de culture homologués en France*. Consultable sur : <http://e-phy.agriculture.gouv.fr>
- PPDB (2009) : The Pesticide Properties Database (PPDB) developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU), University of Hertfordshire, funded by UK national sources and the EU-funded FOOTPRINT project (FP6-SSP-022704).

REICHENBERGER S. (2005) : *Field-scale risk assessment for diffuse-source pesticide inputs into German surface waters*. Thèse. Justus-Liebig-Universität Gießen. Boden und Landschaft, Band 44.

REICHENBERGER S., BACH M., HOLLIS J.M., JARVIS N.J., DUBUS I.G., LEWIS K.A., *et al.* (2008) : *Algorithms for calculation of predicted environmental concentrations based on pesticide inputs, size and discharge of water*

bodies etc. Report DL23 of the FP6 EU-funded FOOTPRINT project [www.eu-footprint.org], 101 p.

WILLIAMS J.R. (1975) : « Sediment Yield Prediction with Universe Equation Using Runoff Energy Factor ». In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. ARS-S-40, p. 244-252.

Résumé

A. CHASLES, M. DEDEWANOU, D. MINC, H. NOËL, E. OPPENEAU, R. TALVA

Évaluer le transfert des produits phytosanitaires entre zones d'application et eaux souterraines. Application « Phyto'Scope » au Val d'Orléans

À l'initiative de la ville d'Orléans, il a été développé puis appliqué sur le périmètre de protection éloignée des captages alimentant la ville (Val d'Orléans au sud de la Loire) un modèle numérique innovant permettant de corréliser et de prévoir, en fonction des pratiques phytosanitaires agricoles, la nature et les quantités de pesticides transférés jusqu'aux captages.

L'application, baptisée Phyto'Scope, a été construite en couplant un modèle de transfert dans le sol réalisé par Footways avec un modèle de transfert dans le sous-sol élaboré par Géo-Hyd.

Une première phase a consisté à recueillir les données nécessaires au paramétrage des modèles : distribution spatiale et type de cultures, pratiques phytosanitaires, climatologie, pédologie, hydrogéologie. D'un point de vue quantitatif, la modélisation dans le sol montre que sur 4 t/an de substances actives appliquées, 43 kg seulement percolent vers le sous-sol et donc vers la nappe. D'un point de vue qualitatif, la modélisation dans le sous-sol permet

d'observer que sur 121 substances appliquées, dix molécules sont restituées par infiltration. Les données issues du modèle « sol » alimentent un maillage de 250 m × 250 m sur tout le périmètre.

Le modèle a permis de tracer une carte des temps de séjour et des vitesses de transfert, une carte des secteurs les plus sensibles et de prévoir les concentrations finales dans les eaux prélevées aux captages. Le métazachlore (au travers de ses deux principaux métabolites) est la molécule la plus transférée et peut dépasser des concentrations supérieures à 0,1 g/L. Les analyses réalisées par la suite dans la ressource ont corroboré ce résultat. Le bon comportement du modèle et sa relative facilité de mise en œuvre permettent d'envisager son utilisation à des fins prédictives ou de sensibilisation, puis de proposer dans un second temps des outils et actions d'animation pour une utilisation des produits phytosanitaires en adéquation avec la protection de la ressource en eau.

Abstract

A. CHASLES, M. DEDEWANOU, D. MINC, H. NOËL, E. OPPENEAU, R. TALVA

Assessment tool for the transfer of pesticides in their areas of application to and through groundwater. "Phyto'Scope" application to the city of Orléans

At the initiative of the city of Orléans was developed a model (called Phyto'Scope) to correlate and predict the amount of pesticides transferred to water catchments through soil and subsoil. It has been applied over the extended protected zone of water catchments supplying the city of Orléans. The application was built by coupling a model of transfer in the soil made by Footways with a model of transfer in the substratum made by Geo-Hyd.

The first phase was the collection of data: spatial distribution of crops, farming practices, climate, soil and hydrogeology.

Modeling transfer throughout the soil concludes that among 4 t/year of active substances applied, only 43 kg percolate to the subsoil, the rest being trickled down or held in plants and in the various soil's compartments.

For the subsoil, the results of the former modelisation concerning the 10 most infiltrated molecules have been introduced in a network with 250 m × 250 m cells, all over the perimeter.

The model has allowed to draw a map of the residence times and transfer speeds, a map of the most sensitive areas and to determine the final concentrations in the water catchments. Metazachlor (M1 and M2 form) is the most transferred molecule and may exceed tolerable limits, which suggest to generalize the analysis of that molecules.

The good reliability of the model and its relative facility of implementation make possible to consider its possible use for predictive purposes or awareness and to provide tools and actions for a more effective use of pesticides.

94^{ème} congrès de l'ASTEE

2 au 5 juin 2015 - MONTAUBAN

DES VILLES ET DES TERRITOIRES SOBRES ET SÛRS

Les services publics locaux de l'eau
et de l'environnement
relèvent le défi



www.aste.org