

Valorisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie et d'une base de données disponible en analyse de sols, dans le cadre de l'évaluation du risque de pollution des eaux souterraines par les pesticides

Boubacar Billo Bah ^(1,2), Marnik Vanclooster ⁽³⁾, Robert Oger ⁽¹⁾, Laurent Bock ⁽²⁾, Gilles Colinet ⁽²⁾

⁽¹⁾ Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W). Département Agriculture et Milieu naturel. Unité Fertilité des Sols et Protection des Eaux. Rue de Liroux, 9. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : b.bah@cra.wallonie.be

⁽²⁾ Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Département Sciences et Technologies de l'Environnement. Unité de Science du Sol. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

⁽³⁾ Université catholique de Louvain (UCL). Earth and Life Institute, ELIE. Croix du Sud, 2 bte L7.05.02. B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).

Cette étude présente l'utilisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW), de la base de données d'analyse de sols Aardewerk et du modèle MetaPEARL pour évaluer la sensibilité des sols agricoles au transfert des pesticides vers les eaux souterraines en Wallonie (Belgique méridionale). MetaPEARL est basé sur une expression analytique qui décrit la concentration de pesticides lixiviés au bas du profil pédologique en fonction de données disponibles sur les caractéristiques des sols, le climat et les propriétés des pesticides. Les résultats obtenus montrent une sensibilité importante des sols au transfert des pesticides avec un coefficient de rétention sur la matière organique (K_{om}) très faible (de l'ordre de $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) ou avec un temps de demi-vie (DT50) relativement élevé (60 jours). Dans ces cas, le pesticide est plus rapidement lixivié car très peu retenu par la matière organique du sol ou se dégrade moins vite et reste donc disponible dans le sol pour être éventuellement lixivié lors de précipitations. La sensibilité au transfert des pesticides observée est par ailleurs fortement corrélée à la texture du sol et à sa teneur en matière organique. On constate également que les concentrations de pesticides lixiviés sont fortement dépendantes du surplus de précipitations (flux d'eau dans le sol ou bilan hydrique). Une analyse de sensibilité du modèle a permis de montrer qu'il est très sensible à l'épaisseur du sol, à la teneur en matière organique, à la densité apparente de la fraction minérale par classe texturale et à la densité apparente de la matière organique. Il s'agit donc des variables pédologiques à estimer avec la plus grande précision sous peine d'affecter une incertitude supplémentaire aux prédictions obtenues. Sur base des variables pédologiques les plus sensibles, l'analyse de l'incertitude « spatiale » liée aux résultats fournis par MetaPEARL, du fait de la considération d'une valeur unique représentative par type de sol et par région (application déterministe), montre que cette approche a tendance à sous-estimer la concentration en pesticide lixivié dans le sol, comparée à une approche stochastique (probabiliste) qui permet la prise en compte de la variabilité des caractéristiques des sols au sein d'un même type de sol. L'approche stochastique permet par ailleurs de calculer un seuil de probabilité (percentile) de risque plus pertinent, qui peut être comparé à une norme imposée dans un contexte de gestion durable des ressources naturelles.

Mots-clés. Pesticide, lessivage du sol, pollution de l'eau, nappe souterraine, modèle de simulation, MetaPEARL, Wallonie.

Making use of the Digital Soil Map of Wallonia and of an available soil analysis database for assessing the risk of pesticide leaching to groundwater. This study shows how the Digital Soil Map of Wallonia and the associated soil database Aardewerk can be combined with the MetaPEARL model to assess the sensitivity of agricultural soils to pesticide transfer into underground water tables in Wallonia (Southern Belgium). MetaPEARL is based on an analytical expression which describes the concentration of leached pesticides at the soil profile bottom depending on available data on soil characteristics, climate and pesticide properties. The results show an important soil sensitivity to pesticide transfer with a coefficient of retention on organic matter (K_{om}) very weak (about $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) or with a relatively high half-life time (DT50 about 60 days). In this case, the pesticide is weakly retained by soil organic matter or slowly degraded and then stays available in the soil and can be quickly leached during rainfalls. In other respects, the pesticide sensitivity to leaching is strongly correlated with soil texture and its organic matter content. It is also observed that the concentration of leached pesticide is strongly depending of the

rainfall surplus (water flux into the soil or hydrous balance). A sensitivity analysis has shown that the model is very sensitive to soil thickness, to organic matter content, to the bulk density of the mineral fraction by textural classes and of the organic matter. Therefore, these pedological variables have to be assessed with the highest precision to avoid adding further uncertainty to the predictions obtained. On the basis of the most sensitive soil variables, the analysis of "spatial" uncertainty related to the results delivered by MetaPEARL, due to the consideration of an unique representative value by soil type and by region (deterministic approach), shows that this approach tends to under-estimate the concentration of pesticide leached in the soil, compared to the use of a stochastic simulation (probabilistic approach) which takes into account the soil characteristic variability within a given soil type. This stochastic approach allows also the calculation of a more relevant threshold of risk probability (percentile) which can be compared to an imposed standard in view to enhance a sustainable management of natural resources.

Keywords. Pesticides, leaching, soil sensitivity, water pollution, groundwater, simulation models, MetaPEARL, Wallonia.

1. INTRODUCTION

La pollution des ressources en eau par les pesticides d'origine agricole représente un problème environnemental majeur pour la gestion durable des eaux, tant à l'échelle nationale qu'europpéenne. Les directives et stratégies européennes en la matière, telles que la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2000) et la Stratégie thématique sur l'utilisation durable des pesticides (Commission des Communautés européennes, 2006) imposent aux États membres de prendre les mesures nécessaires afin de limiter l'impact des pesticides sur l'homme et l'environnement.

En Wallonie (Belgique méridionale), 80 % de l'eau de distribution provient des captages d'eau souterraine (SPW-DGARNE, 2010). Des indicateurs de risque de pollution des eaux souterraines par les pesticides sont donc nécessaires afin d'aider les autorités à atteindre les objectifs fixés par la législation, mais également de pouvoir évaluer et consolider les progrès réalisés dans le cadre de la gestion durable des ressources en eau.

Une des étapes clés de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines liée à l'usage des pesticides est la détermination de la sensibilité des sols aux transferts des pesticides vers les eaux souterraines, qui peut être évaluée à partir de l'estimation des concentrations en pesticides lixivies au bas du profil pédologique (FOCUS, 2000 ; Tiktak et al., 2006 ; FOCUS, 2009), qui pourraient donc atteindre les nappes d'eau souterraines (approche conservatrice). L'objectif est que la concentration prédite d'un pesticide particulier dans les nappes d'eau potabilisable soit inférieure à la norme de potabilité de $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, fixée dans le cadre de la DCE. Étant donné la complexité des phénomènes impliqués dans le devenir des pesticides dans les sols, les modèles mécanistes, basés sur une description physique rigoureuse des processus de transferts, sont des outils potentiellement pertinents (Vanclooster et al., 2004) qui permettent de prédire les concentrations en pesticides dans divers compartiments de l'environnement (on parle de PEC – *Predicted Environmental Concentration*), notamment dans le sol.

Les modèles utilisent principalement des informations disponibles sur les caractéristiques des sols, le climat et les propriétés des pesticides pour décrire/évaluer le devenir des pesticides dans l'environnement. Cette approche par modélisation est également recommandée et utilisée par le groupe d'experts FOCUS¹ mis en place par la Commission européenne pour fournir des directives en matière d'homologation (autorisation) des pesticides (FOCUS, 2000 ; FOCUS, 2009). Les modèles d'estimation des PEC disponibles vont des plus complexes (dynamiques et multicouches) aux plus simples (basés sur une équation analytique). Les modèles complexes contiennent un grand nombre de variables d'entrée parfois difficiles à estimer, tandis que les modèles simples sont généralement basés sur une équation analytique ne décrivant que les processus les plus importants et réduisent donc les données nécessaires à l'application du modèle. Cette simplification rend le modèle plus compatible avec les bases de données disponibles, améliore sa « transparence » et facilite donc son utilisation comme outil d'aide à la décision (Tiktak et al., 2006). Cependant, les modèles simples conduisent le plus souvent à un biais (Tiktak et al., 2006) de la fraction de pesticide lixivié, du fait qu'ils ne tiennent généralement pas compte de l'hétérogénéité verticale (morphologique) des sols et se basent sur l'hypothèse de conditions à l'équilibre hydrodynamique (flux d'eau et de solutés constants). Tiktak et al. (2002) ont notamment montré que la concentration en pesticide lixivié est sous-estimée lorsque l'hétérogénéité morphologique du sol n'est pas prise en compte (on considère le profil de sol comme étant homogène).

En Wallonie, des informations détaillées sur les caractéristiques des sols et le climat sont disponibles pour une utilisation dans une démarche de modélisation mécaniste du transfert des pesticides du sol vers les eaux souterraines. La Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) et la base de données d'analyse des

¹ Forum for the Co-ordination of pesticide fate models and their USE.

sols Aardewerk, qui a accompagné la réalisation des relevés de terrain, sont des sources d'informations diversifiées sur les caractéristiques des sols, utilisables dans le cadre de la modélisation du transfert des pesticides vers les eaux souterraines.

Cette étude a pour objectif principal de valoriser l'information pédologique disponible en Wallonie, au travers de la CNSW et de la base de données Aardewerk, dans le cadre de l'évaluation de la sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux souterraines, à partir d'un modèle mécaniste déterministe simple appelé MetaPEARL (Tiktak et al., 2006). Insistons sur le fait que ce travail a pour ambition de prédire la sensibilité intrinsèque du sol (notamment sensibilité relative d'un sol par rapport à un autre) et n'a pas la prétention d'estimer des concentrations « réelles » (absolues) de pesticides qui se retrouvent au bas du profil pédologique. L'évaluation de la sensibilité des sols est réalisée pour quatre pesticides « types » (A, B, C et D), définis par le groupe FOCUS (FOCUS, 2000), couvrant un large spectre physico-chimique parmi les pesticides généralement employés. Dans une deuxième étape, nous procédons à une analyse de l'incertitude associée aux résultats obtenus par la modélisation, en se focalisant sur les données pédologiques. L'analyse est limitée à l'incertitude associée aux résultats fournis par MetaPEARL, du fait de la non-prise en compte de la variabilité des caractéristiques pédologiques au sein des Unités Cartographiques des Sols (UCS) lors d'une application déterministe (considération d'une valeur représentative unique pour chaque variable d'entrée) de MetaPEARL. Cette analyse d'incertitude liée aux variables pédologiques permet de mettre en évidence l'importance de la prise en compte de la variabilité au sein des UCS, grâce à une application stochastique du modèle déterministe MetaPEARL.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. MetaPEARL

MetaPEARL est un métamodèle du modèle mécaniste plus complet GeoPEARL. La « métamodélisation » consiste à réduire le modèle mécaniste complet en une équation mathématique (analytique) simple, en ne considérant que les processus (rétention, dégradation, etc.) auxquels les sorties (*outputs*) du modèle complet d'origine sont les plus sensibles, et en ne se focalisant que sur les variables d'entrée du modèle d'origine qui sont facilement accessibles, au travers notamment de la carte des sols et des bases de données d'analyse de sols. Cette simplification rend le métamodèle plus facile d'utilisation et plus « transparent » comparé au modèle d'origine.

MetaPEARL a été calibré à partir de simulations de concentrations en pesticide lixivié à 1 m de profondeur du sol, obtenues via EuroPEARL (Tiktak et al., 2004). Ce dernier modèle est la version de GeoPEARL (Tiktak et al., 2003) paramétrée à l'échelle européenne. Donc, MetaPEARL fournit lui-même la concentration en pesticide lixivié à maximum 1 m de profondeur. Il s'agit en effet de la profondeur recommandée dans le cadre de la Directive européenne « eaux souterraines » (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2006) pour une détection précoce de la pollution des eaux souterraines par les pesticides. Les pesticides lixiviés à cette profondeur sont considérés comme pouvant facilement atteindre les nappes souterraines (approche conservatrice). La concentration en pesticide lixivié prédite par MetaPEARL pourra alors être comparée à la norme de potabilité ($0,1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) des eaux souterraines en vue d'évaluer le risque potentiel de pollution des nappes d'eau. Les lignes qui suivent décrivent brièvement MetaPEARL. De plus amples détails sur ce métamodèle sont fournis dans Tiktak et al. (2006).

GeoPEARL, à partir duquel MetaPEARL a été mis au point, est un modèle mécaniste, dynamique, multi-couches et spatialement distribué. Il considère un flux transitoire d'eau et de soluté, une isotherme d'adsorption de Freundlich, une cinétique de dégradation du premier ordre et un prélèvement passif des pesticides par la plante. Il tient compte de la différenciation verticale (morphologique) du profil, alors que MetaPEARL considère le profil pédologique comme étant homogène, par l'utilisation de caractéristiques pédologiques moyennes (pondérées par les épaisseurs des horizons pédologiques) sur le mètre de profil. Il n'intègre donc pas la différenciation verticale des sols. MetaPEARL suppose également un flux d'eau et de solutés constant. Il considère par ailleurs un sol initialement « libre » de tout pesticide, sur lequel on applique une dose annuelle de $1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ à la surface du sol, un jour après l'émergence de la plante. L'absorption racinaire du pesticide est également ignorée du fait que celle-ci n'est réellement significative que si la rétention du pesticide par la matière organique du sol est quasiment nulle (Tiktak et al., 2006). MetaPEARL a également été calibré pour deux saisons climatiques, correspondant à deux périodes d'application des pesticides : printemps et automne.

MetaPEARL a été validé par comparaison avec EuroPEARL, sur base de méthodes qualitatives (observation visuelle subjective) et quantitatives (indicateurs statistiques de performance comme le RMSE – *Root Mean Square Error*). La performance du métamodèle est généralement bonne puisqu'il explique plus de 90 % de la variabilité des sorties d'EuroPEARL (Tiktak et al., 2006).

L'équation de MetaPEARL est la suivante :

$$C_L = \exp(\alpha_0 - \alpha_1 \cdot X_1 - \alpha_2 \cdot X_2) \quad (\text{équation 1})$$

$$\text{avec : } X_1 = \frac{\mu \cdot \theta \cdot L}{q} \quad (\text{équation 2})$$

$$\text{et } X_2 = \frac{\mu \cdot \rho \cdot f_{\text{om}} \cdot K_{\text{om}} \cdot L}{q} \quad (\text{équation 3})$$

où C_L ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) est la concentration en pesticide lixivié par l'eau du sol au bas du profil pédologique ou à maximum 1 m de profondeur si le profil est plus épais que cette profondeur cible ; μ (jour^{-1}) le coefficient de dégradation de premier ordre du pesticide ($\mu = \frac{\ln(2)}{DT50}$,

avec $DT50$ (jour) le temps de demi-vie du pesticide) ; θ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) la teneur en eau volumique du sol ; L (m) la profondeur du sol ; q (m par jour) le flux d'eau dans le sol (bilan hydrique ou recharge nette) ; ρ ($\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$) la densité apparente du sol ; f_{om} ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) la fraction en matière organique du sol et K_{om} ($\text{dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) le coefficient d'adsorption du pesticide sur la matière organique du sol. α_0 , α_1 et α_2 sont les constantes empiriques de calibration, qui sont fonction de la période d'application (automne ou printemps).

2.2. Application de MetaPEARL pour la Wallonie (Belgique méridionale)

La concentration en pesticide lixivié au bas du profil pédologique (maximum 1 m de profondeur) représente un indice de sensibilité intrinsèque du sol au transfert de pesticide vers les eaux souterraines. Les simulations sont effectuées pour quatre pesticides génériques (A, B, C et D) définis par le groupe FOCUS (FOCUS, 2000) et pour deux saisons climatiques (printemps et automne), correspondant à deux périodes distinctes d'application des pesticides. Les étapes de traitement des données nécessaires au calcul de la concentration en pesticide lixivié au bas du profil de sol avec MetaPEARL sont présentées à la **figure 1**. Pour une meilleure compréhension de cette figure, le lecteur est prié de se référer au texte ci-après.

Spatialisation des données pédologiques ponctuelles (profils). Les données relatives aux propriétés physico-chimiques des sols, nécessaires à MetaPEARL (**Tableau 1**), sont issues de la base de données Aardewerk (Van Orshoven et al., 1993 ; Legrain et al., 2005). Seuls les profils d'Aardewerk² sous culture ont été considérés (**Figure 2**). En tout, 3733 profils sous culture pour un nombre total de 15 161 horizons pédologiques ont été considérés pour la Wallonie,

chaque profil étant caractérisé par plusieurs horizons décrits et analysés au laboratoire. Afin de dériver de ces données ponctuelles (profils), une carte continue des concentrations en pesticides lixiviés vers les eaux souterraines sur l'ensemble des terres agricoles wallonnes, il est nécessaire de les spatialiser. Plusieurs techniques géostatistiques (polygonation de Thiessen, méthode des distances inverses, krigeage, etc.) permettent de réaliser facilement et rapidement cette spatialisation par interpolation. Cependant, ces méthodes résultent souvent en des cartes à l'aspect « lisse » et ne tiennent pas compte explicitement des caractéristiques physiques liées à la variable à spatialiser.

Afin de pallier ces inconvénients, nous avons choisi de réaliser la spatialisation sur base des Unités Cartographiques de Sols (UCS)³ de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) (Bock et al., 2008), correspondant aux Unités Typologiques de Sols (UTS) de la Carte « papier » des sols de la Belgique à 1/20 000.

Préalablement à cette spatialisation, il faut affecter les profils culturaux Aardewerk aux UCS correspondantes (mêmes caractéristiques morphogénétiques) de la CNSW, sur une base régionale. Pour réaliser ces affectations régionales, la technique par *regional class-matching* (Van Orshoven, 1993) a été adoptée. L'affectation par *regional class-matching* permet de considérer les spécificités régionales des sols, notamment géologiques. En d'autres termes, un type de profil pédologique de la base de données Aardewerk n'est affecté qu'aux UCS correspondantes rencontrées dans la même région « géomorphopédologique » d'où provient le profil. Les régions « géomorphopédologiques » utilisées pour l'affectation régionale des profils Aardewerk sont les Districts de l'Espace Rural (DER) (**Figure 3**), délimités principalement sur base de la CNSW et en tenant compte de la géologie, du relief et des grands traits de l'occupation du sol (Bock et al., 2007). Les profils Aardewerk sont donc affectés aux UCS correspondantes de la CNSW district par district. Les valeurs des variables mesurées en chaque profil Aardewerk sont donc affectées à tous les polygones de la CNSW ayant le même sigle pédologique au sein d'un même DER.

² Cette base de données a été constituée à partir des résultats d'analyses physiques et physico-chimiques des profils de sols décrits, échantillonnés et analysés au laboratoire lors du levé de la Carte des Sols de la Belgique (IRSIA, 1947-1991). Les analyses portent sur les caractéristiques granulométriques, la teneur en matière organique et divers autres paramètres tels que le pH, la CEC, etc.

³ Ces UCS sont nommées par les sigles pédologiques de la légende de la Carte des Sols de la Belgique.

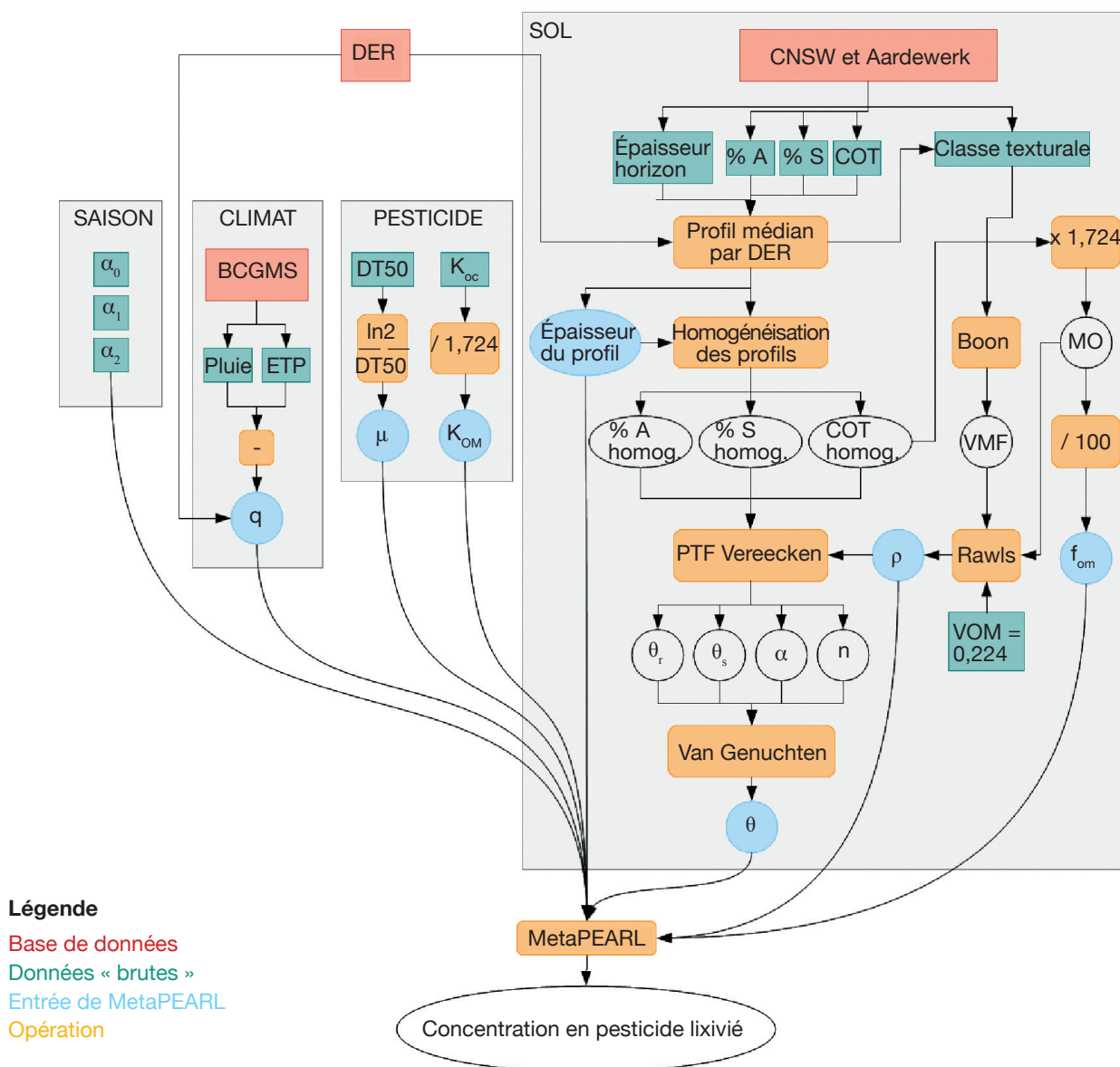
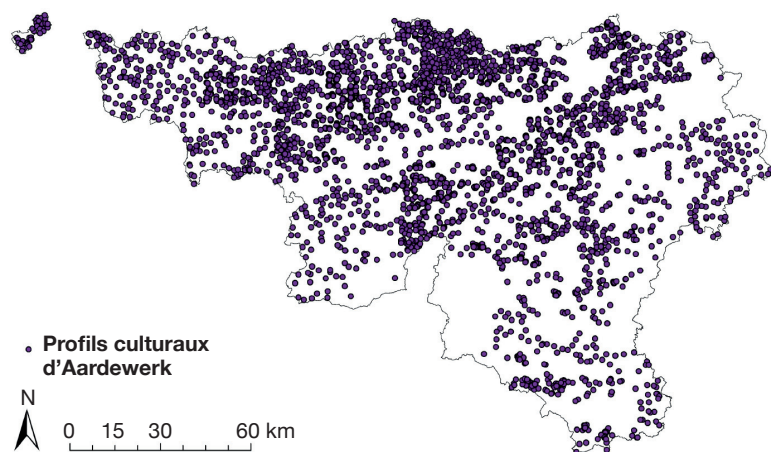
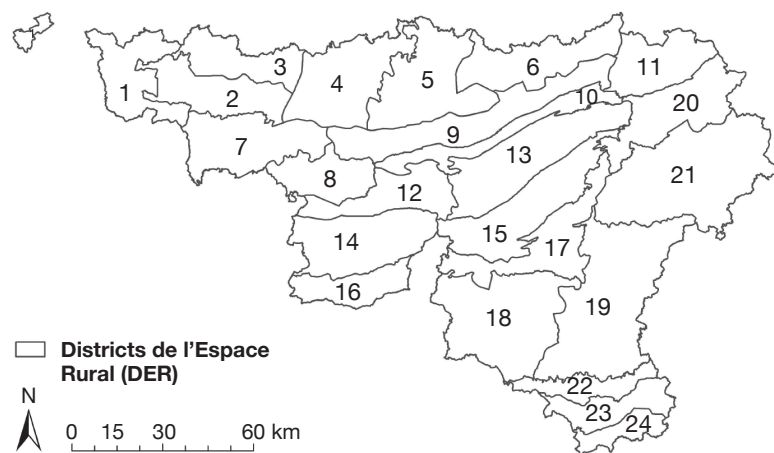


Figure 1. Représentation synoptique de l'application de MetaPEARL pour la Wallonie (Belgique méridionale) — *Diagram of the MetaPEARL application for Wallonia (Southern Belgium)*.

BCGMS : système belge de monitoring de la croissance des cultures — *Belgian crop growth monitoring system* ; COT : pourcentage de carbone organique total — *percentage of organic carbon* ; COT homog. : pourcentage moyenne (pondéré par les épaisseurs des horizons) en carbone organique total du profil — *average (using thickness as weighing factor) percentage of organic carbon of the soil profile* ; DER : district de l'espace rural — *rural districts* ; DT50 : temps de demi-vie du pesticide — *pesticide half-life* ; ETP : évapotranspiration potentielle — *potential evapotranspiration* ; K_{oc} : coefficient d'adsorption du pesticide sur le carbone organique du sol — *soil organic carbon sorption coefficient of the pesticide* ; K_{om} : coefficient d'adsorption du pesticide sur la matière organique du sol — *soil organic matter sorption coefficient of the pesticide* ; $\ln 2$: logarithme népérien de 2 — *natural logarithm of 2* ; MO : pourcentage de matière organique — *percentage of organic matter* ; % A : pourcentage d'argile — *percentage of clay* ; % A homog. : pourcentage moyenne (pondéré par les épaisseurs des horizons) en argile du profil — *average (using thickness as weighing factor) percentage of clay of the soil profile* ; % S : pourcentage de sable — *percentage of sand* ; q : flux d'eau dans le sol — *soil water flux* ; S. homog. : pourcentage moyenne (pondéré par les épaisseurs des horizons) en sable du profil — *average (using thickness as weighing factor) percentage of sand of the soil profile* ; VMF : densité apparente de la fraction minérale du sol — *bulk density of the mineral soil fraction* ; PTF : fonction de pédotransfert — *pedotransfer function* ; ρ : densité apparente du sol — *soil bulk density* ; f_{om} : fraction en matière organique — *fraction of organic matter* ; VOM : densité apparente de la fraction en matière organique du sol — *bulk density of the organic matter fraction* ; α_0 , α_1 , α_2 : constantes empiriques de calibration — *empirical calibration constants* ; n et α : paramètres de forme de l'équation de rétention en eau du sol de Van Genuchten — *shape parameters of soil water retention equation of Van Genuchten* ; μ : coefficient de dégradation de premier ordre du pesticide — *first order degradation rate of the pesticide* ; θ : teneur en eau volumique du sol — *soil volume fraction of water* ; θ_r : teneur en eau résiduelle du sol — *residual soil water content* ; θ_s : teneur en eau du sol à saturation — *saturated soil water content*.

Tableau 1. Propriétés pédologiques brutes nécessaires aux calculs des variables d'entrée pédologiques de MetaPEARL — *Required raw soil properties for the calculation of MetaPEARL soil input variables.*

Propriétés des sols	Origine
Classe texturale du sol	CNSW / Aardewerk
Nombre d'horizons reconnus dans le profil	Aardewerk
Épaisseur des horizons (m)	Aardewerk
Épaisseur totale du profil (m)	Aardewerk
Pourcentage d'argile (% - $g \cdot 100g^{-1}$)	Aardewerk
Pourcentage de sable (% - $g \cdot 100g^{-1}$)	Aardewerk
Pourcentage en matière organique (% - $g \cdot 100g^{-1}$)	OM = Corg (Aardewerk) * 1,724

**Figure 2.** Représentation spatiale des profils de sol sous culture de la base de données Aardewerk en Wallonie (Belgique méridionale) — *Spatial representation of agricultural soil profiles of the Aardewerk database in Wallonia (Southern Belgium).***Figure 3.** Limites des 24 Districts de l'Espace Rural (DER) de Wallonie (Belgique méridionale), définis principalement à partir de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) — *Boundaries of the 24 rural Districts (DER) of Wallonia, defined on the basis of the Digital Soil Map of Wallonia (DSMW).*

Par ailleurs, si au sein du même DER, plusieurs profils Aardewerk sont rencontrés pour un même type de sol, un profil théorique « médian » est dès lors déterminé et affecté à l'ensemble des UCS de la CNSW correspondant au type de sols considéré. Ce profil théorique médian est défini en déterminant les caractéristiques physiques et physico-chimiques médianes horizon par horizon pour chaque unité typologique de sols. En tout, 7540 horizons « médians » représentatifs ont été définis, pour un nombre total de 1769 profils.

Cette méthode d'affectation, si elle présente l'avantage de tenir compte des spécificités géomorphopédologiques à travers la CNSW et les DER, exige cependant un temps d'implémentation nettement supérieur aux techniques géostatistiques traditionnelles. De plus, le calcul des caractéristiques médianes des horizons des profils ne tient pas compte de la variabilité observée au sein d'une même UCS (approche déterministe).

Variables d'entrée pédologiques (cadre « SOL » de la figure 1). Les variables d'entrée de MetaPEARL relatives aux propriétés des sols (Figure 1) sont l'épaisseur du profil (L), la densité apparente du sol (ρ), la fraction de matière organique du sol (f_{om}) et la teneur en eau du sol à la capacité au champ (θ). Ces variables d'entrée sont calculées sur base des données brutes sur les épaisseurs des horizons, les fractions granulométriques en argile et sable, la teneur en carbone organique du sol et la classe texturale du sol, disponibles dans Aardewerk et la CNSW (Tableau 1). Dans un premier

temps, les caractéristiques médianes des horizons des profils sont déterminées. Ensuite, une valeur moyenne, pondérée par les épaisseurs des horizons pédologiques, est calculée sur l'ensemble du profil pour chacune des données brutes précitées, afin de définir une valeur unique par profil (homogénéisation du profil), nécessaire au calcul des variables d'entrée de MetaPEARL (qui ne prend pas en compte la différenciation verticale du profil).

L'épaisseur totale du profil est calculée comme étant la somme des épaisseurs des horizons constituant le profil. Une épaisseur maximale de 1 m est considérée lorsque l'épaisseur du profil est supérieure à cette dernière valeur.

La fraction en matière organique (f_{om}) est obtenue en multipliant la fraction en carbone organique total (f_{cot})⁴ par 1,724, qui est le facteur de conversion pour les sols cultivés (Baize, 2000). La densité apparente du sol (ρ) est estimée à partir de la fonction de pédotransfert⁵ de Rawls (1983), calibrée pour les sols belges par Boon (Van Orshoven, 1993). L'humidité du sol (θ) à la capacité au champ (pF = 2,4) est estimée à partir du modèle de Van Genuchten (1980) et grâce aux fonctions de pédotransfert de Vereecken (1988) qui permettent le calcul des paramètres du modèle de Van Genuchten.

Variable d'entrée climatique (cadre « CLIMAT » de la figure 1). Les données météorologiques journalières utilisées pour calculer le flux d'eau dans le sol « q » (bilan hydrique ou recharge nette de la nappe) nécessaire à MetaPEARL proviennent du système belge de monitoring des rendements des cultures « B-CGMS » (Tychon et al., 2000). Le flux d'eau au bas du profil

pédologique est calculé comme la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). La moyenne sur la période 1988-2008 des sommes annuelles des précipitations et ETP a été calculée par B-CGMS en chaque maille d'une grille de 10 km x 10 km couvrant la Wallonie. La valeur médiane de ces précipitations et ETP calculées par grille a ensuite été déterminée pour chaque DER. Les valeurs médianes de « q » obtenues varient entre 162 (DER 6)⁶ et 559 mm par an (DER 18)⁷.

Variables d'entrée liées aux propriétés des pesticides (cadre « PESTICIDE » de la figure 1). Les propriétés des pesticides génériques A, B, C et D ont été définies de manière à ce qu'ils couvrent un large spectre physico-chimique des pesticides couramment employés. Leurs caractéristiques nécessaires à MetaPEARL sont reprises au **tableau 2**. Il s'agit du temps de demi-vie ou constante de dégradation (DT50) et du coefficient de partage du pesticide entre la matière organique et l'eau (K_{om}). Ces quatre pesticides sont considérés comme montrant des comportements de sorption indépendants du pH du sol (FOCUS, 2000).

Les modalités d'usage des pesticides prises en compte sont : une application annuelle, soit au printemps (sur maïs) ou en automne (sur blé d'hiver), à une dose de 1 kg·ha⁻¹, un jour avant l'émergence et à la surface du sol.

Constantes de calibration liées à la saison climatique d'application des pesticides (cadre « SAISON » de la figure 1). Pour rappel, MetaPEARL a été calibré pour deux saisons climatiques, correspondant à deux périodes d'application des pesticides : printemps et automne. Les paramètres du modèle choisis pour ces deux saisons sont présentés au **tableau 3**. Ils

Tableau 3. Paramètres de régression de MetaPEARL pour des applications de pesticides au printemps et en automne — *Regression parameters of MetaPEARL for spring and autumn applications of pesticides.*

Paramètre	Printemps	Automne
α_0	4,72	4,95
α_1	0,39	0,16
α_2	0,58	0,60

$$^4 f_{cor} = \frac{\% \text{COT}}{100}$$

⁵ Une fonction de pédotransfert utilise des données pédologiques brutes mesurées et reprises dans les bases de données pédologiques existantes pour estimer des données pédologiques non directement disponibles dans ces mêmes bases de données.

⁶ District des sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye orientale (DER 6).

⁷ District des sols limono-caillouteux de l'Ardenne centro-occidentale (DER 18).

Tableau 2. Propriétés des quatre pesticides « types » utilisés — *Properties of the four classic types of pesticides used.*

Pesticide	Définition	K_{om} (dm ³ ·kg ⁻¹)	DT50 (jours)
A	Moyennement persistant, faiblement adsorbant et non volatil	60	60
B	Faiblement persistant, très faiblement adsorbant et quelque peu volatil	10	20
C	Faiblement persistant et moyennement adsorbant	100	20
D	Faiblement persistant et faiblement adsorbant	35	20

correspondent à la zone climatique « *TW - Temperate and Wet* » (tempérée et humide) choisie pour nos régions.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Estimation des concentrations en pesticides lixiviés pour la Wallonie entière

MetaPEARL prédit des concentrations en pesticides lixiviés qui augmentent dans l'ordre suivant : pesticide B > pesticide A > pesticide C \approx pesticide D, comme le montrent les **figures 4** et **5**, respectivement pour le printemps et l'automne. Les sols sont donc plus sensibles à la lixiviation (transfert vers les eaux souterraines) des pesticides A et B et moins sensibles pour les pesticides C et D, comme l'ont également montré Tiktak et al. (2006). En effet, lorsque le coefficient de rétention sur la matière organique est très faible (cas du pesticide B avec un K_{om} de $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) ou que le temps de demi-vie est relativement élevé (cas

du pesticide A avec un DT50 de 60 jours), le pesticide est plus rapidement lixivié car très peu retenu par la matière organique du sol (cas du pesticide B) ou se dégrade moins vite et reste donc disponible dans le sol pour être éventuellement lixivié lors de précipitations. Tandis que quand le coefficient de rétention du pesticide sur la matière organique du sol est très élevé et que son temps de demi-vie est faible, ce qui est notamment le cas pour le pesticide C (K_{om} de $100 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ et DT50 de 20 jours), la concentration en pesticide lixivié est très faible ($< 0,01 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) tant au printemps qu'en automne. Le pesticide est dans ce cas fortement retenu par la matière organique du sol (du fait de son K_{om} élevé) et plus rapidement dégradé (DT50 de 20 jours).

Par ailleurs, seuls les pesticides de type A et B permettent de distinguer des régions relativement contrastées d'un point de vue de la sensibilité de leurs sols à la lixiviation des pesticides. Le fort contraste régional observé pour ces deux pesticides montre une bonne corrélation avec les teneurs en sable (**Figure 6**) et en matière organique (**Figure 7**) d'une

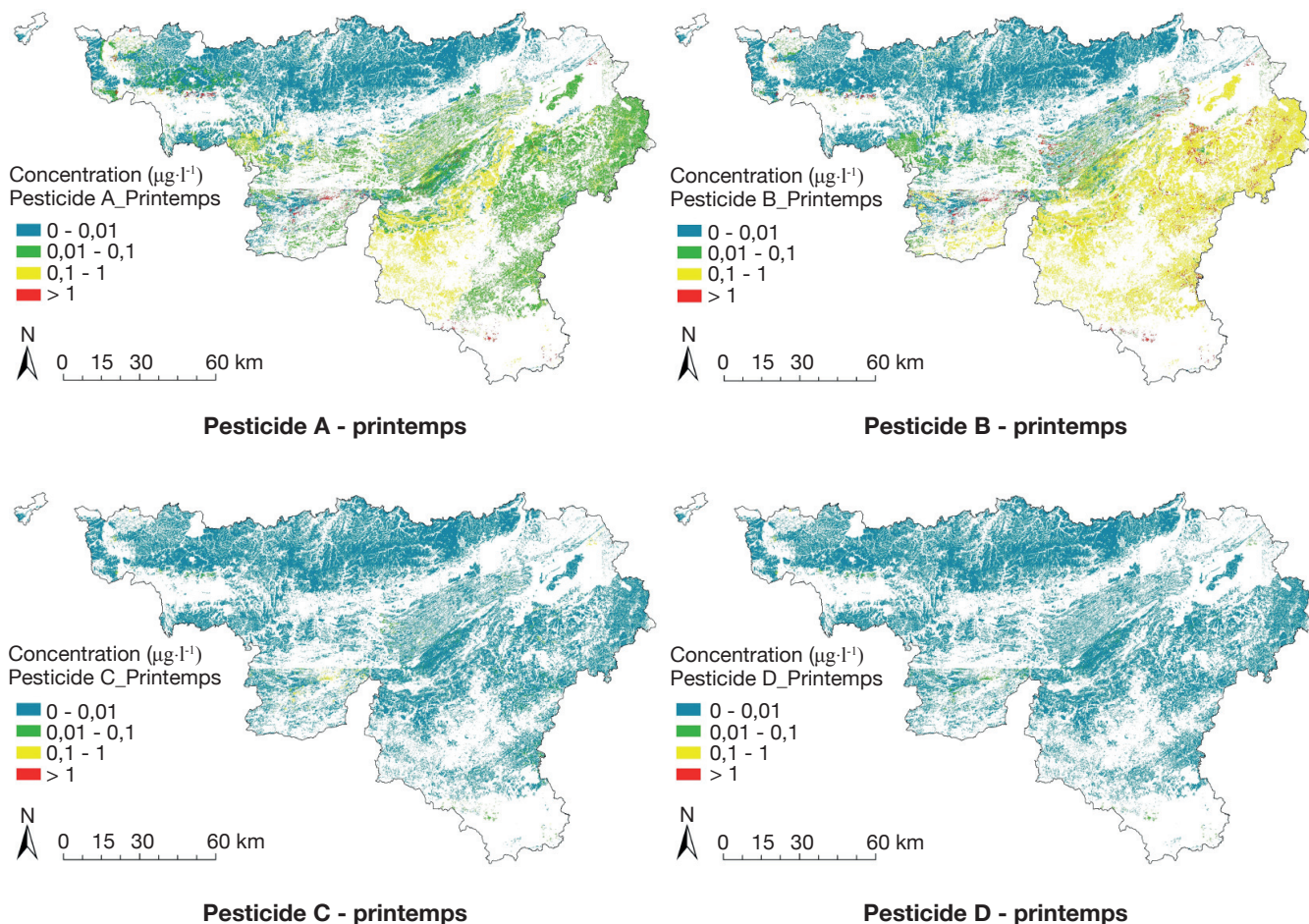


Figure 4. Concentrations en pesticides A, B, C et D lixiviés estimées pour des applications de pesticides au printemps en Wallonie (Belgique méridionale) — *Concentrations of leached A, B, C and D pesticides estimated for spring applications of pesticides in Wallonia (Southern part of Belgium).*

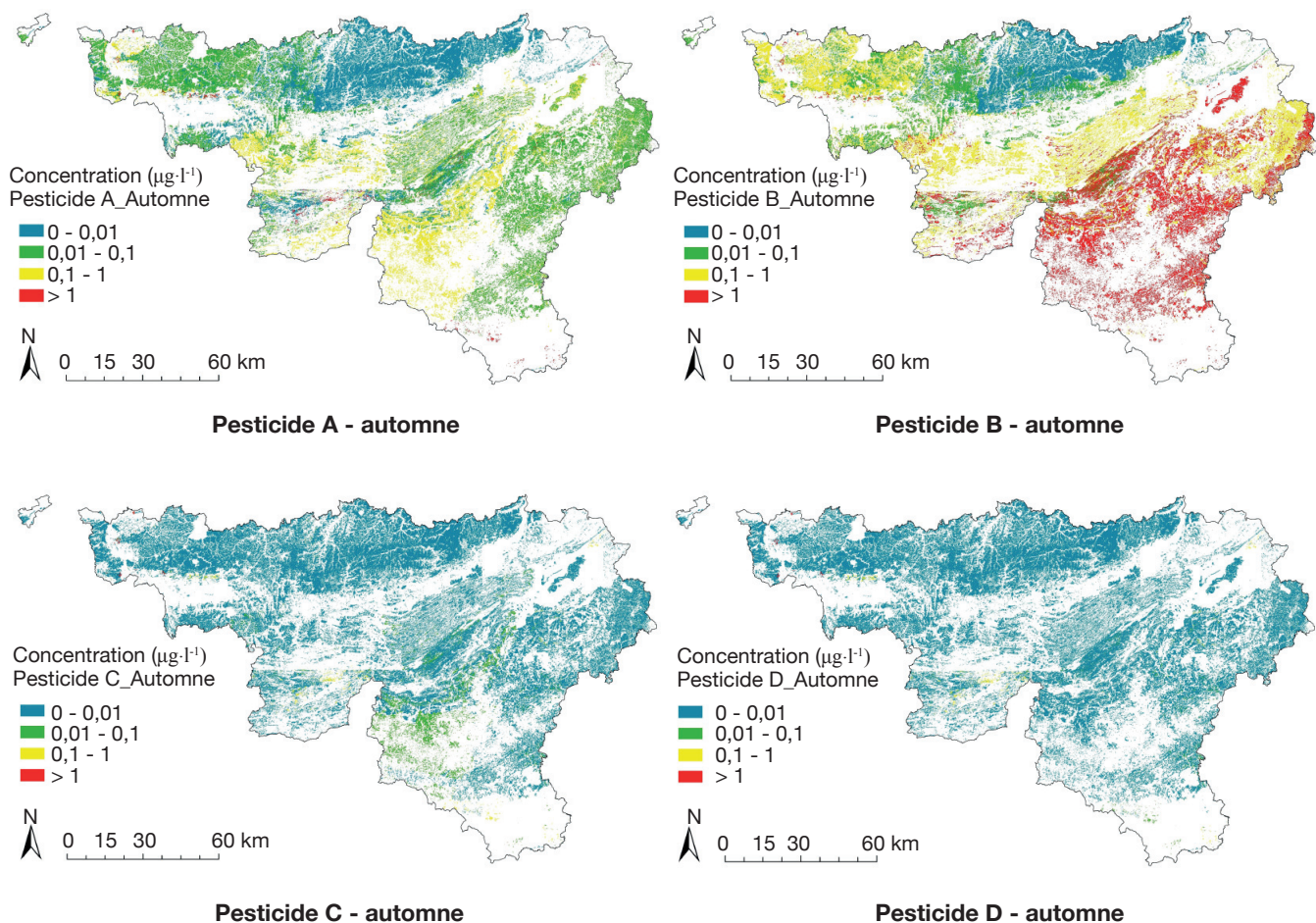


Figure 5. Concentrations en pesticides A, B, C et D lixiviés estimées pour des applications de pesticides en automne en Wallonie (Belgique méridionale) — *Concentrations of leached A, B, C and D pesticides estimated for autumn applications of pesticides in Wallonia (Southern part of Belgium).*

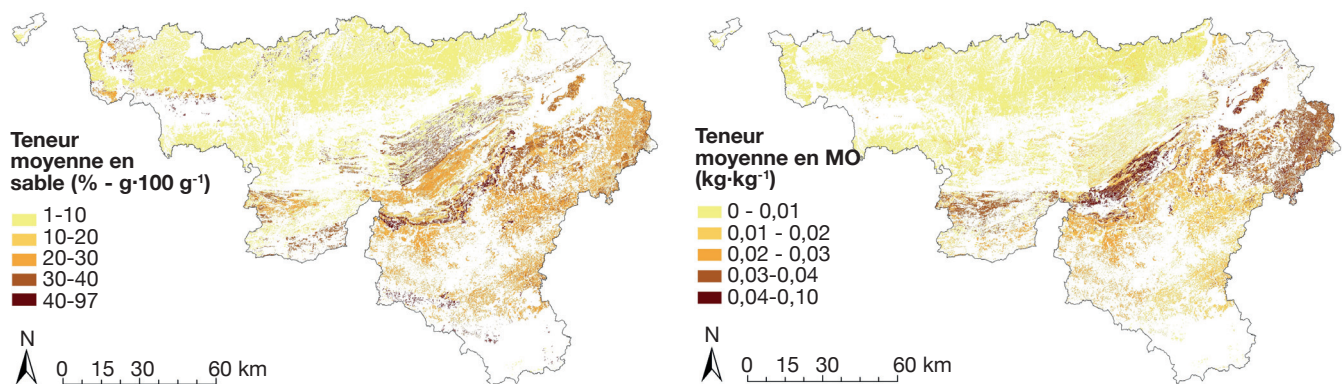


Figure 6. Teneurs moyennes pondérées (par les épaisseurs des horizons) en sable des profils cultivés représentatifs (caractéristiques médianes des horizons des profils) de la base de données Aardewerk par unité typologique de sols, pour la Wallonie (Belgique méridionale) — *Average (using horizon thickness as weighing factor) sand content of cultivated and representative soil profiles (median characteristics of soil profile horizons) from Aardewerk database for Wallonia (Southern part of Belgium).*

Figure 7. Teneurs moyennes pondérées (par les épaisseurs des horizons) en matière organique des profils cultivés représentatifs (caractéristiques médianes des horizons des profils) de la base de données Aardewerk par unité typologique de sols, pour la Wallonie (Belgique méridionale) — *Average (using horizon thickness as weighing factor) organic matter content of cultivated and representative soil profiles (median characteristics of soil profile horizons) from Aardewerk database for Wallonia (Southern part of Belgium).*

part, et le bilan hydrique (flux d'eau dans le sol/surplus de précipitations) (**Figure 8**) d'autre part. En effet, notamment pour le pesticide B, on observe une augmentation des concentrations lixiviées avec l'augmentation de la teneur en sable des sols. Ce qui s'explique par la dominance de la fraction grossière (200-2000 μm) au sein de la fraction granulométrique sableuse *s.l.* (50-2000 μm), telle que renseignée par la base de données Aardewerk (Van Orshoven et al., 1993), qui permet un mouvement rapide de l'eau et des substances actives dissoutes dans le sol. En outre, au nord du sillon Sambre-et-Meuse (régions limoneuse et sablo-limoneuse), où le bilan hydrique varie peu d'une région à l'autre, les concentrations en pesticides lixiviés diminuent avec l'augmentation des teneurs en matière organique des sols qui, avec la fraction argileuse du sol, joue un rôle d'adsorbant (rétention) pour les pesticides. Au sud du sillon Sambre-et-Meuse (régions condrusienne, faménienne et ardennaise), malgré des sols agricoles bien pourvus en matière organique (**Figure 7**), puisqu'il s'agit généralement d'anciennes prairies reconverties en terres cultivées, les concentrations en pesticides lixiviés prédites augmentent généralement avec le surplus de précipitations (flux d'eau dans le sol). L'évapotranspiration potentielle (qui entre dans le calcul du surplus de précipitations) variant peu⁸ d'une région à l'autre en Wallonie, les concentrations en pesticides lixiviés prédites pour le sud du sillon Sambre-et-Meuse dépendent donc principalement des précipitations qui y sont plus importantes et très contrastées, notamment du fait d'un relief qui y est plus marqué.

En outre, on constate également, surtout pour les pesticides A et B, que MetaPEARL prédit des concentrations en pesticides lixiviés plus importantes en automne qu'au printemps. Ceci confirme le fait que la fraction de pesticide qui percole en profondeur est extrêmement sensible à la quantité de pluie, surtout au cours de la période qui suit directement l'application du produit, comme l'ont également montré Tiktak et al. (2004 ; 2006). Donc, les importants événements pluvieux qui suivent directement les applications de pesticides sont particulièrement impliqués dans le transfert des pesticides vers les nappes souterraines, surtout dans les sols avec une texture grossière comme les sols sableux.

Notons qu'un facteur important du devenir de certains pesticides dans le sol, mais non pris en compte par MetaPEARL, est le pH du sol. En effet, tel que

⁸ Comme le montre la base de données climatique B-CGMS, les valeurs médianes par grille de 10 km x 10 km des moyennes annuelles sur une série temporelle de 20 ans (1988-2008) varient de 607 à 685 mm par an, pour une variation pluviométrique analogue de 728 à 1 272 mm par an.

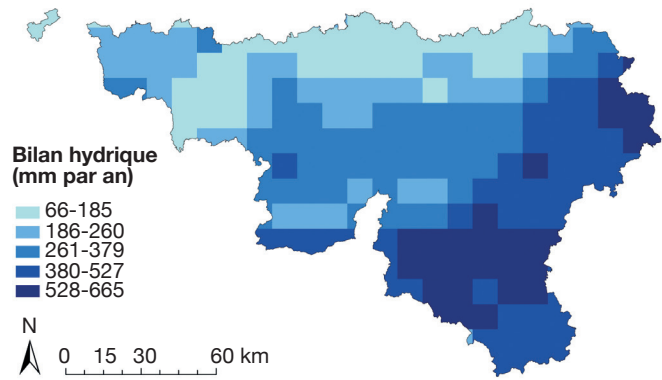


Figure 8. Bilan hydrique moyen annuel sur 20 ans (1988-2008) par maille de 10 km x 10 km de la base de données météorologiques B-CGMS pour la Wallonie (Belgique méridionale) — *Average annual water balance over 20 years (1988-2008) by 10 km x 10 km grid of the B-CGMS meteorological database for Wallonia (Southern part of Belgium).*

déjà évoqué (cfr § 2.2. Variables d'entrée liées aux propriétés des pesticides), certains pesticides montrent des comportements de sorption directement dépendant du pH du sol (FOCUS, 2000 ; FOCUS, 2009). Stuber (2009) a notamment observé pour un pesticide donné, et avec le modèle GeoPEARL, des concentrations lixiviées très faibles dans des sols en condition acide (pH < 5) de Flandre, et très élevées pour des sols avec un pH > 5 de la même région.

Il est par ailleurs important d'insister sur le fait que les cartes de concentrations en pesticides lixiviés qui ont été réalisées (**Figures 4 et 5**) représentent la sensibilité du premier mètre de sol au transfert des pesticides. Il ne s'agit donc pas de cartes de risque global lié à l'usage des pesticides qui, elles, doivent notamment prendre en compte les pressions engendrées par l'apport de pesticides (pressions anthropiques). Ce propos est bien illustré par la carte relative aux concentrations en pesticide B lixivié en automne (**Figure 5**). La région limoneuse y ressort comme étant peu sensible et l'Ardenne très sensible, alors que la région limoneuse est plus à vocation agricole et que l'emploi de pesticides y est donc plus important (SPW-DGARNE, 2010).

3.2. Analyse d'incertitude liée aux estimations fournies par MetaPEARL

Un problème fondamental lié à l'utilisation des modèles de prédiction est l'incertitude dont sont entachées les prédictions effectuées. Cette incertitude est notamment liée aux approximations successives opérées lors de la modélisation des processus et de la généralisation de ces modèles à un vaste domaine, ou à l'estimation des paramètres d'entrée du modèle (Dubus et al., 2003 ; Vanclooster et al., 2004). Élucider la question

de l'incertitude associée aux résultats fournis par les modèles est donc indispensable si une quelconque application de ces résultats est envisagée, notamment dans le cadre de processus décisionnels.

Dans le cadre de cette étude, nous nous focalisons sur l'incertitude liée à l'estimation des paramètres d'entrée pédologiques du métamodèle MetaPEARL, par l'utilisation de la CNSW et de la base de données Aardewerk. Deux types d'incertitudes liés à l'estimation de ces variables peuvent être identifiés :

- l'incertitude que l'on peut qualifier de « verticale », engendrée par la considération d'une valeur moyenne (pondérée par les épaisseurs des horizons) sur toute l'épaisseur du profil, comme entrée pour MetaPEARL, ignorant ainsi la variabilité morphologique (verticale) du profil ;
- l'incertitude qualifiée de « spatiale », liée à la prise en compte de caractéristiques médianes pour les horizons des profils par type de sol et par DER (approche déterministe), qui entraîne donc la non considération de la variabilité des caractéristiques pédologiques au sein de la même UCS d'un même DER.

Dans le cadre de cette étude, nous ne traitons que l'incertitude « spatiale », celle liée donc à la variabilité spatiale des caractéristiques pédologiques au sein des UCS. L'analyse est conduite dans le cadre de cette étude-ci à l'échelle des DER 12⁹ et 13¹⁰ couvrant le Condroz. La considération de l'échelle régionale comme unité de référence pour l'analyse d'incertitude permet de tenir compte de la spécificité régionale des sols, une même série de sols (UCS) de la CNSW pouvant montrer des particularités géo-morpho-pédologiques propres à la région dans laquelle elle est localisée. Nous nous limitons également au pesticide B, pour lequel les sols montrent un plus grand contraste de sensibilité à sa lixiviation vers les eaux souterraines, pour des applications en automne.

Préalablement à l'analyse d'incertitude proprement dite, nous procédons à une analyse de sensibilité afin d'identifier les variables auxquelles MetaPEARL est le plus sensible, qui requièrent donc une grande précision, sous peine d'accroître l'incertitude liée aux prédictions réalisées. L'analyse va se limiter à ces variables sensibles.

Analyse de sensibilité de MetaPEARL aux variables pédologiques. Les variables pédologiques dont la sensibilité a été testée sont : l'épaisseur du profil (L), la fraction en matière organique du sol (f_{om}), la densité apparente de la matière organique du sol

(VOM)¹¹, la densité apparente de la fraction minérale du sol par classe texturale (VMF)¹² et les teneurs en argile (%) et sable (%). L et f_{om} sont deux variables d'entrée directes de MetaPEARL (cfr § 2.1.). VOM et VMF interviennent, avec la matière organique, dans le calcul de la densité apparente globale du sol (ρ), qui est également une variable d'entrée directe de MetaPEARL. Les teneurs en argile et sable sont indirectement¹³ utilisées dans le calcul de l'humidité volumétrique du sol à la capacité au champ (θ), qui est la dernière variable pédologique d'entrée directe de MetaPEARL. L'analyse de sensibilité a été réalisée avec la méthode qui consiste à faire varier un facteur à la fois, en maintenant tous les autres constants.

La modification de - 10 % et + 10 % de la valeur initialement prise par chaque variable fournit deux valeurs de sortie supplémentaires du modèle (en plus de la valeur de sortie initiale obtenue à partir de la valeur d'entrée initiale). De ces deux valeurs d'entrée (correspondant aux modifications de - 10 % et + 10 %), celle produisant la plus grande variation au niveau de la sortie est retenue pour l'évaluation. Un pourcentage de variation (Favis-Mortlock et al., 1990¹⁴ cité par Félix et al., 2005) et un indice de sensibilité (Jolicoeur, 2002¹⁵ cité par Félix et al., 2005) sont calculés d'après les formules suivantes :

$$\%Variation = \left| \frac{S_2 - S_1}{S_1} \right| \times 100 \quad (\text{équation 4})$$

$$IS = \frac{\frac{S_2 - S_1}{S_{moy}}}{\frac{E_2 - E_1}{E_{moy}}} \quad (\text{équation 5})$$

¹¹ Selon Van Orshoven (1993), VOM vaut 0,224 kg·dm⁻³.

¹² VMF varie en fonction de la classe texturale du sol. VMF est égale à 1,55 kg·dm⁻³ pour les classes de texture Z et S, 1,41 kg·dm⁻³ pour les classes P, A et E, 1,30 kg·dm⁻³ pour la classe L, 1,35 kg·dm⁻³ pour la classe U et 1,25 kg·dm⁻³ pour la classe G (Van Orshoven, 1993).

¹³ Les teneurs en argile (%) et sable (%) interviennent dans les fonctions de pédotransfert de Vereecken pour le calcul de l'humidité résiduelle du sol (θ_r), de l'humidité du sol à saturation (θ_s) et des paramètres de forme de la courbe de rétention en eau du sol (m , n et α). θ_r , θ_s , m , n et α sont ensuite utilisés dans le modèle de Van Genuchten pour calculer l'humidité volumétrique du sol à la capacité au champ (θ) (cfr § 2.1.).

¹⁴ Favis-Mortlock D.T. & Smith F.R., 1990. A sensitivity analysis of EPIC. In: Sharpley W., ed. EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator, 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture. *Agric. Techn. Bull.*, **1768**, 178-190, cité par Félix et al., 2005.

¹⁵ Jolicoeur, 2002. *Screening designs sensitivity of a nitrate leaching model (ANIMO) using a one-at-a-time method*. Binghamton, NY, USA: Binghamton University, State University of New York, cité par Félix et al., 2005.

⁹ District des sols limono-caillouteux ou limoneux du Condroz en rive gauche de Meuse-Entre-Sambre-et-Meuse (DER 12).

¹⁰ District des sols limono-caillouteux ou limoneux du Condroz en rive droite de Meuse (DER 13).

où « %Variation » est le pourcentage de variation de MetaPEARL par rapport à la sortie initiale, « IS » est l'indice de sensibilité de la sortie du métamodèle ; E_1 la valeur initiale (avant modification) de la variable d'entrée ; E_2 la valeur testée retenue (-10 % ou +10 % de la valeur initiale) ; E_{moy} la moyenne entre E_1 et E_2 ; S_1 et S_2 sont respectivement les sorties correspondant à E_1 et E_2 ; S_{moy} est la moyenne entre S_1 et S_2 . Ces indices permettent d'avoir une base quantitative pour exprimer la sensibilité des sorties du modèle vis-à-vis des variables d'entrée. Le pourcentage de variation indique directement l'impact de la variation d'une variable d'entrée sur la sortie du modèle. Un indice de sensibilité (IS) égal à 1 indique que le taux de variation d'un paramètre donné entraîne le même taux au niveau des sorties ; une valeur négative indique que les entrées et les sorties varient en sens inverse et plus grand est l'indice en valeur absolue, plus grand est l'impact qu'un paramètre donné pourra avoir sur une sortie spécifique.

Les figures 9 et 10 représentent respectivement le pourcentage de variation et l'indice de sensibilité de la concentration en pesticide « B » lixivé en automne à 1 m de profondeur d'un sol « Aba1 »¹⁶ du Condroz, estimée par MetaPEARL, pour des variations de $\pm 10\%$ des variables d'entrée considérées. Les résultats obtenus montrent que les variables pédologiques auxquelles le modèle est le plus sensible sont par ordre d'importance l'épaisseur du profil de sol (L), la fraction en matière organique (f_{om}), la densité apparente de la fraction minérale du sol (VMF) et la densité apparente de la matière organique du sol (VOM). Il s'agit donc des variables pour lesquelles on doit disposer de sources de données de qualité, sous peine d'affecter une incertitude supplémentaire aux concentrations prédites par MetaPEARL. On observe notamment qu'une augmentation de 10 % de la fraction en matière organique du sol (f_{om}) peut entraîner une diminution de quasiment 50 % de la concentration en pesticide B lixivé, étant donné un indice de sensibilité négatif pour cette variable.

Analyse de l'incertitude liée à MetaPEARL. Sur base des quatre variables pédologiques les plus sensibles (épaisseur du profil de sol, fraction en matière organique, densité apparente de la fraction minérale du sol et densité apparente de la matière organique du sol), une analyse d'incertitude a été réalisée pour trois types de sols représentatifs, d'un point de vue surfacique, des terres cultivées¹⁷ en Wallonie. Ce sont : Aba1 (sols limoneux à drainage naturel favorable, à horizon B textural ; variante à horizon A mince), Aca1 (sols limoneux à drainage naturel modéré, à horizon B textural ; variante à horizon A mince) et Gbap2 (sols limono-caillouteux à charge psammitique, à drainage naturel favorable, à horizon B textural ; substrat psammitique apparaissant entre 40 et 80 cm de

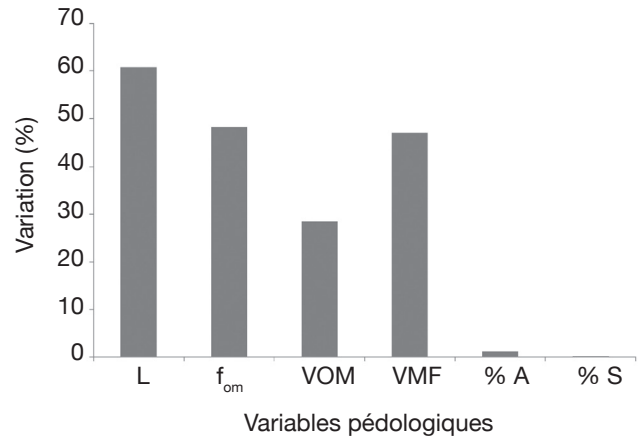


Figure 9. Pourcentage de variation de la concentration en pesticide B lixivé en automne fournie par MetaPEARL, pour des variations de 10 % des variables d'entrée pédologiques pour un sol Aba1 du Condroz — *Variation in percentage of the concentration of leached pesticide B in autumn calculated by MetaPEARL for a variation of 10% of soil input variables for Aba1 soil type from Condroz.*

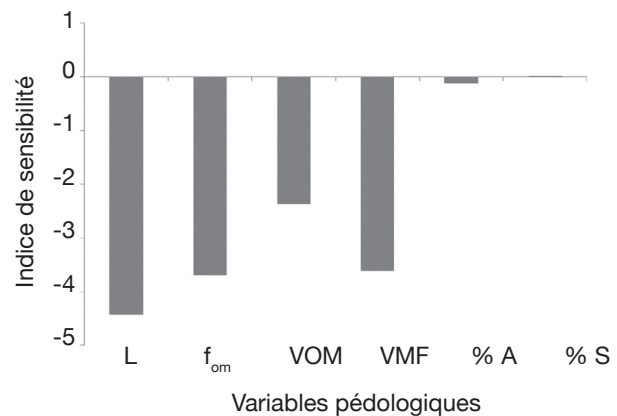


Figure 10. Indice de sensibilité de la concentration en pesticide B lixivé en automne fournie par MetaPEARL pour des variations de 10 % des variables d'entrée pédologiques pour un sol Aba1 du Condroz — *Sensitivity index of the concentration of leached pesticide B in autumn calculated by MetaPEARL, for a variation of 10% of soil input variables for Aba1 soil type from Condroz.*

Un indice de sensibilité négatif signifie que la variable d'entrée et la sortie varient en sens inverse — *A negative index means that the input variable and the output vary in opposite ways.*

¹⁶ Sols limoneux à drainage favorable, variante à horizon A mince. Ces sols couvrant 18 % de la surface totale des sols cultivés en Wallonie, d'après la Carte d'Occupation des Sols de Wallonie – Version V2_07.

¹⁷ Les sols cultivés ont été déterminés sur base du croisement entre la CNSW et la carte d'Occupation des Sols de Wallonie – COSW – version V2_07 (FUSAGX et al., 2007). Précisons que les prairies, qui occupent quasiment la moitié de la surface agricole utile et sur lesquelles on met très rarement de pesticides, n'ont pas été prises en compte.

profondeur). Les profils considérés de ces trois types de sols proviennent des DER 12 et 13, couvrant la région du Condroz, où les sols Aba1, Aca1 et Gbap2 occupent respectivement 10 %, 2 % et 7 % des sols cultivés (prairies exclues) dans ces deux DER.

La méthode d'analyse d'incertitude utilisée est celle dite de Monte Carlo (Zhang et al., 1993). Elle consiste en une application stochastique (probabiliste) du modèle déterministe MetaPEARL. Dans un premier temps, il est procédé à une reconstitution d'une population de 1000 valeurs aléatoires, pour chacune des quatre variables les plus sensibles précitées, selon une distribution normale ou non normale autour de la valeur initiale observée (moyenne) et en considérant un écart-type donné. Ensuite, la concentration en pesticide B lixivié en automne est calculée pour chaque combinaison de valeur aléatoire obtenue.

Pour chacune des quatre variables sensibles considérées, la valeur initiale (moyenne) et l'écart-type qui sont utilisés dans l'approche de Monte-Carlo sont calculés ou fixés, et la distribution de probabilité caractérisant chaque variable est déterminée (Tableau 4). Pour la variable « MO », la moyenne et l'écart-type sont calculés sur base du nombre de profils (échantillons) disponibles dans les DER 12 et 13, et sa distribution est déterminée à partir du test de normalité de Anderson-Darling, qui permet de vérifier si une variable suit une distribution normale ou pas. En effet, la distribution caractérisant la variable est utilisée dans la génération aléatoire des valeurs de la variable en question. Les teneurs en MO du sol Aba1 suivent une distribution log-normale¹⁸ pour une population de 42 profils, tandis que celles des sols Aca1 et Gbap2 suivent des distributions normales¹⁹ pour des populations respectives de 9 et 7 profils.

En ce qui concerne la variable « L », étant donné qu'elle a été déterminée sur le terrain par le cartographe avec une certaine imprécision, nous lui avons affecté un écart-type (incertitude) de 10 % par rapport à sa moyenne (Tableau 4). Nous avons par ailleurs fait l'hypothèse qu'elle suit une distribution normale. Pour

les variables fixées « VOM » et « VMF », un écart-type de 10 % leur a également été affecté, et nous avons aussi dans leur cas fait l'hypothèse qu'elles suivent des distributions normales (Tableau 4).

Les figures 11, 12 et 13 représentent respectivement pour les sols Aba1, Aca1 et Gbap2, les histogrammes de la distribution de fréquences des 1000 prédictions des concentrations en pesticide B lixivié en automne, obtenues à partir des 1000 valeurs aléatoires (stochastiques) générées pour les variables sensibles, en gardant les autres variables d'entrée « non sensibles » à leur valeur initiale. Ces figures montrent que la prise en compte de la variabilité (donc de l'incertitude) spatiale des quatre variables pédologiques sensibles engendre une dispersion très importante des concentrations en pesticide B lixivié prédites. On observe également des différences dans les formes des distributions stochastiques des concentrations en pesticide B lixivié des trois types de sols, qui s'expliquent par l'observation de distributions de probabilités différentes pour les variables pédologiques, d'un type de sol à l'autre, comme cela a également été observé par Planchon (2007).

Le tableau 5 reprend les prédictions déterministes (calculées pour chaque type de sol à partir d'une valeur moyenne unique représentative du sol dans les DER 12 et 13) et stochastiques (avec, pour chaque type de sol, prise en compte de la variabilité spatiale des variables au sein des DER 12 et 13) des concentrations en pesticide B lixivié en automne (C_L) pour les trois types de sols considérés. La principale information

¹⁸ La distribution de fréquence de la MO des sols Aba1 montre une distribution dissymétrique gauche. La probabilité du test de normalité de « Anderson-Darling » étant par ailleurs inférieure à 5 % (0,05), le test est significatif, donc la distribution n'est pas normale. Par contre, le test de log-normalité de la distribution montre bien que la MO suit une distribution log-normale car la probabilité du test de « Anderson-Darling » est supérieure à 5 %.

¹⁹ La probabilité du test de normalité de « Anderson-Darling » étant supérieure à 5 % (0,05), le test n'est pas significatif, donc la distribution est normale.

Tableau 4. Moyenne, écart-type et type de distribution considérés pour les sols Aba1, Aca1 et Gbap2 des DER 12 et 13, dans l'analyse de l'incertitude liée à MetaPEARL — *Mean, standard deviation and distribution type for Aba1, Aca1 and Gbap2 soils of DER 12 and 13, in the MetaPEARL uncertainty analysis.*

Variables sensibles	Aba1			Aca1			Gbap2		
	Moy.	E-T.	Distr.	Moy.	E-T.	Distr.	Moy.	E-T.	Distr.
f_{om} (kg·kg ⁻¹)	0,007	0,002	Log-normale	0,006	0,001	Normale	0,012	0,003	Normale
L (m)	1,000	0,100	Normale	1,000	0,100	Normale	0,900	0,09	Normale
VOM (kg·dm ⁻³)	0,224	0,022	Normale	0,224	0,022	Normale	0,224	0,022	Normale
VMF (kg·dm ⁻³)	1,410	0,140	Normale	1,410	0,140	Normale	1,410	0,140	Normale

Moy. : moyenne — *mean* ; E-T. : écart-type — *standard deviation* ; Distr. : distribution de probabilité — *probability distribution*.

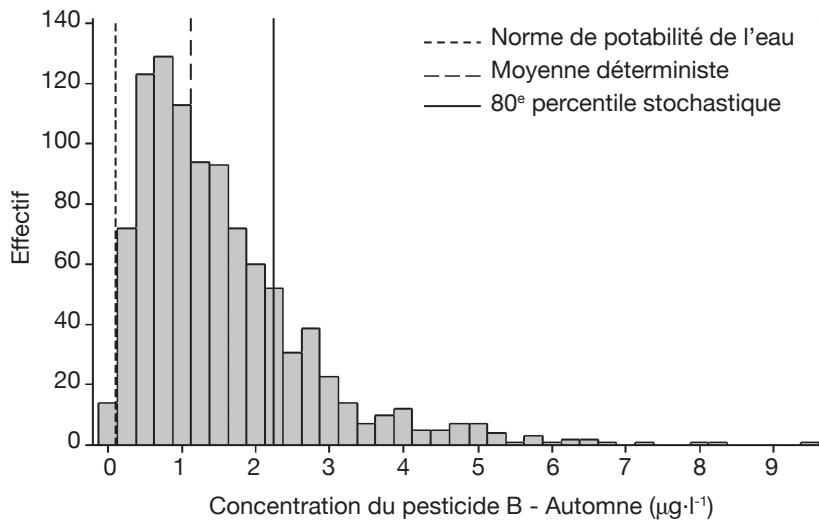


Figure 11. Distribution de fréquences des 1000 prédictions aléatoires des concentrations en pesticide B lixivié en automne pour un sol Aba1 (DER 12-13, Condroz) — *Frequency distribution of 1,000 random values of leached pesticide B concentrations leaching in autumn for Aba1 soil (DER 12-13, Condroz).*

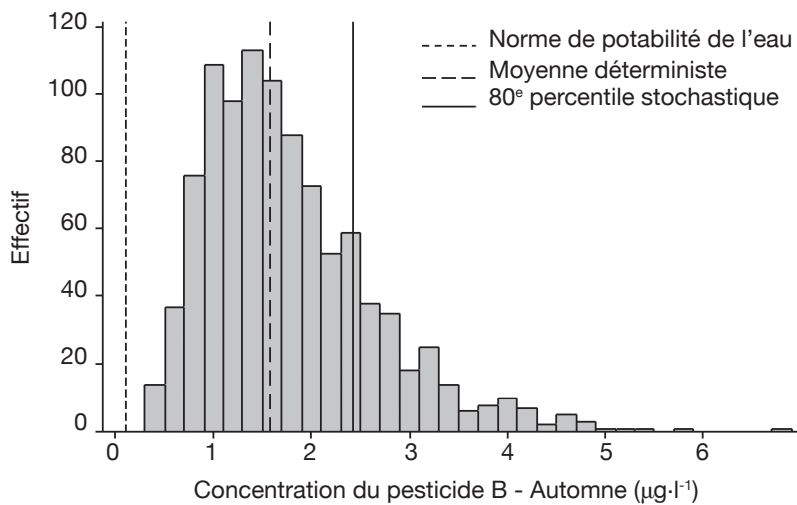


Figure 12. Distribution de fréquences des 1000 prédictions aléatoires des concentrations en pesticide B lixivié en automne pour un sol Aca1 (DER 12-13, Condroz) — *Frequency distribution of 1,000 random values of leached pesticide B concentrations in autumn for Aca1 soil (DER 12-13, Condroz).*

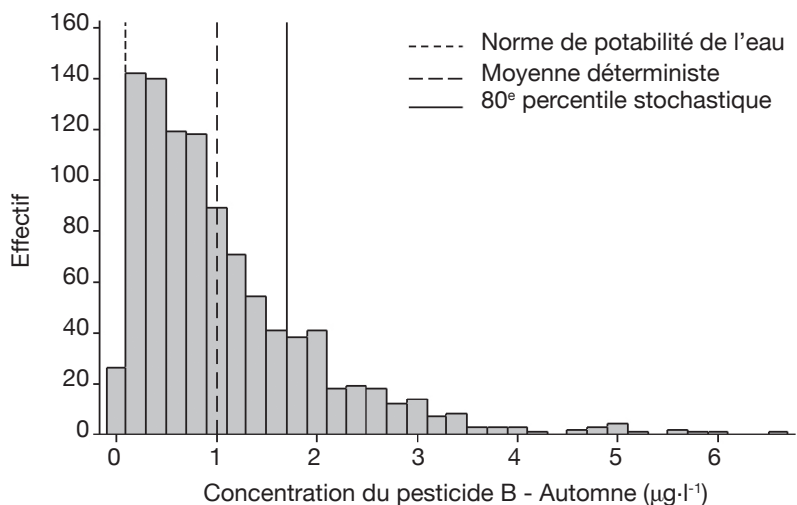


Figure 13. Distribution de fréquences des 1000 prédictions aléatoires des concentrations en pesticide B lixivié en automne pour un sol Gbap2 (DER 12-13, Condroz) — *Frequency distribution of 1,000 random values of leached pesticide B concentrations in autumn for Gbap2 soil (DER 12-13, Condroz).*

Tableau 5. Prédictions déterministes et stochastiques (moyenne, médiane et 80^e percentile) des concentrations en pesticide B lixivié (C_L) en automne pour les sols Aba1, Aca1 et Gbap2 — *Deterministic and stochastic predictions (mean, median and 80th percentile) of leached pesticide B concentrations in autumn for Aba1, Aca1 and Gbap2 soils.*

Sol	Prédictions déterministes des C_L en pesticide B en automne ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)	Prédictions stochastiques des C_L en pesticide B en automne ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)		
		Moyenne	Médiane	80 ^e percentile
Aba1	1,12	1,55	1,24	2,26
Aca1	1,58	1,78	1,61	2,43
Gbap2	1,01	1,53	1,15	2,37

qui ressort de ce tableau est que les prédictions stochastiques (moyenne, médiane et 80^e percentile) sont toutes supérieures à la prédiction déterministe du sol correspondant. Par ailleurs, le fait que la valeur moyenne déterministe soit différente de la moyenne stochastique confirme la non-linéarité du métamodèle MetaPEARL.

L'approche stochastique est donc plus appropriée puisqu'elle permet, par la prise en compte de la variabilité spatiale des paramètres les plus sensibles du modèle, de calculer des concentrations en pesticide B lixivié plus réalistes.

En conséquence, pour la cartographie du risque à des fins d'outil d'aide à la décision, il est pertinent de considérer un seuil de probabilité qui permet de couvrir une part importante du risque. Ce seuil de probabilité peut être le 80^e percentile spatial (ligne verticale continue des **figures 11, 12 et 13**) des concentrations en pesticide B lixivié, qui signifie que 80 % de la variabilité spatiale est couverte (FOCUS, 2000 ; FOCUS, 2009). Cette valeur de 80^e percentile peut donc être considérée comme la valeur de référence dans le cadre d'un processus décisionnel. Elle sera comparée à une valeur cible, en vue de décider de l'acceptabilité ou non du risque. Par exemple, dans le cadre de la protection des eaux souterraines vis-à-vis de la pollution par les pesticides, rappelons que pour qu'une eau soit potabilisable, il ne faut pas qu'elle présente une concentration d'un pesticide donné supérieure à $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (norme de potabilité de l'eau). Si le 80^e percentile en concentration de pesticide lixivié est supérieur à cette valeur cible de $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, on peut admettre que le sol est sensible à la lixiviation du pesticide en question. Concrètement, on regarde donc si 80 % des cas de variabilité présentent une concentration en pesticide lixivié inférieure à la concentration limite de $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ pour les eaux souterraines. On tolère donc que 20 % des cas dépassent ce seuil limite. Dans le cas de nos trois types de sols (Aba1, Aca1 et Gbap2), le 80^e percentile des concentrations (respectivement de 2,26, 2,43 et $2,37 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) en pesticide B lixivié est supérieur à la norme de probabilité de $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (**Figures 11, 12 et 13**). Donc, dans un contexte de gestion des ressources

en eaux souterraines et sur base des hypothèses d'application des pesticides émises (apport de $1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ à la surface du sol), ces trois types de sols peuvent être considérés comme sensibles au transfert du pesticide B vers les eaux souterraines.

4. CONCLUSION

Le métamodèle MetaPEARL a été appliqué à l'échelle de la Wallonie pour évaluer la sensibilité des sols à la lixiviation des pesticides vers les eaux souterraines, sur base de la CNSW, des DER et des données d'analyses de sols de la base de données Aardewerk. L'estimation des concentrations potentielles en pesticides lixiviés a été faite pour quatre pesticides types (A, B, C et D) recommandés par le groupe d'experts européens FOCUS, et pour deux saisons climatiques (printemps et automne), correspondant à deux périodes d'application annuelle des pesticides. On observe une sensibilité importante des sols à la lixiviation des pesticides de type A (coefficient de rétention sur la matière organique – K_{om} de $60 \text{ dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ et temps de demi-vie – DT50 de 60 jours) et B (K_{om} de $10 \text{ dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ et DT50 de 20 jours) et une faible sensibilité pour les types C (K_{om} de $100 \text{ dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ et DT50 de 20 jours) et D (K_{om} de $35 \text{ dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ et DT50 de 20 jours). Cette observation confirme donc le fait que la lixiviation soit plus importante pour les pesticides avec un K_{om} très faible (de l'ordre de $10 \text{ dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ pour le pesticide B) ou un DT50 relativement élevé (60 jours pour le pesticide A). Dans ces cas, le pesticide est plus rapidement lixivié car respectivement très peu retenu par la matière organique du sol ou se dégrade moins vite et reste donc disponible dans le sol pour être éventuellement lixivié lors de précipitations. Par ailleurs, seuls les pesticides A et B permettent de distinguer des zones diversement sensibles au sein de la Wallonie.

Cependant, si un modèle simple comme MetaPEARL permet plus facilement de prédire et cartographier, grâce notamment à l'existence de la CNSW, la sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux souterraines, par une approche

déterministe (considération d'une valeur unique qui peut être la moyenne, la médiane, etc.), comme c'est le cas dans cette étude, une grande incertitude est associée à ces résultats déterministes fournis par MetaPEARL. D'abord, d'une part parce que MetaPEARL considère un profil de sol homogène sur toute son épaisseur (ignorant donc la variabilité morphologique du profil), et d'autre part du fait notamment qu'il ne tient pas compte de la variabilité spatiale (latérale) au sein d'une même unité cartographique de sols (UCS), par la considération d'une valeur moyenne par UCS et par région. Une analyse de l'incertitude liée à MetaPEARL a donc été réalisée. Celle-ci s'est focalisée sur l'incertitude spatiale liée à l'application déterministe de MetaPEARL et en considérant uniquement les variables pédologiques. Elle a permis d'estimer l'effet de l'imprécision des variables pédologiques, sur les prédictions fournies par MetaPEARL.

Tout d'abord, une analyse de sensibilité de MetaPEARL pour les variables pédologiques montre qu'il faut surtout rester attentif sur l'estimation de l'épaisseur du profil pédologique, de la fraction en matière organique du sol et des densités apparentes des fractions minérale et organique du sol, sous peine d'affecter une incertitude supplémentaire aux concentrations prédites par MetaPEARL.

L'analyse d'incertitude a permis de montrer que la prise en compte de la variabilité spatiale des variables pédologiques les plus sensibles, selon une approche stochastique, engendre une dispersion très importante des concentrations en pesticide B lixivié prédites par MetaPEARL. Par ailleurs, les concentrations moyenne, médiane et 80^e percentile stochastiques du pesticide B lixivié sont supérieures à la concentration moyenne déterministe du même pesticide. L'approche déterministe a donc tendance à sous-estimer les concentrations en pesticide lixivié prédites. Dans un cadre de prise de décision en matière environnementale, l'approche stochastique est donc plus appropriée. Une valeur de référence stochastique acceptable devra néanmoins être fixée. Il peut s'agir du 80^e percentile, tel que recommandé par le groupe d'expert européen FOCUS, chargé de fournir des directives en matière de modélisation du devenir des pesticides dans les sols. Le choix du 80^e percentile signifie qu'on couvre 80 % de la variabilité spatiale observée, et donc du risque éventuel. Dans le cadre d'une évaluation de la sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux souterraines, on pourra notamment décider de comparer cette valeur seuil de probabilité de risque avec la norme de potabilité des eaux souterraines (0,1 µg.l⁻¹) pour décider si le sol est sensible ou pas au transfert d'un pesticide donné vers les eaux souterraines. On dira que le sol n'est pas à risque si 80 % des situations (prédictions stochastiques) présentent des concentrations inférieures à ladite norme. On accepte

donc que la norme soit éventuellement dépassée dans 20 % des cas.

Si l'approche stochastique montre sa pertinence par rapport à l'approche déterministe, elle reste néanmoins plus difficile à mettre en œuvre. Pour pouvoir être utilisée à l'échelle d'une grande région comme la Wallonie, où la quantité d'information pédologique détaillée disponible sur les sols est très importante, au travers de la CNSW (plus de 6000 types de sols) et de la base de données Aardewerk (plus de 3700 profils sous culture), l'approche stochastique nécessite le développement de techniques de traitement des données plus souples et performantes (programmation, etc.) permettant d'automatiser les opérations.

En perspectives, il serait intéressant d'explicitier les différences observées entre approches déterministe et stochastique. Si la non-linéarité du modèle explique une part de celles-ci, les grands écarts observés pourraient également provenir du type de distribution de probabilité choisi pour les variables sensibles, voire de la propagation de l'incertitude engendrée par la prise en compte simultanée de la variabilité des quatre variables sensibles.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet PESTEAX (Mise au point d'un Système d'Information Géographique (SIG), à l'échelle de la parcelle, évaluant le risque de pollution des eaux par l'usage des pesticides), financé par le Centre wallon de Recherches agronomiques. Nous remercions le comité de pilotage de ce projet pour l'ensemble des avis, remarques et commentaires pertinents émis lors de la réalisation de ce travail, ainsi que Dr. ir. V. Planchon pour l'aide fournie lors de l'analyse statistique des données.

Bibliographie

- Baize D., 2000. *Guide des analyses en pédologie*. 2^e éd. Paris : INRA Éditions.
- Bock L. & Bah B., 2007. *Carte des Unités de l'Espace Rural. Convention financée par la Région Wallonne (DGA, MRW)*. Gembloux, Belgique : Unité Sol-Écologie-Territoire (Laboratoire de Géopédologie) et Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Bock L., Legrain X., Veron P., Bracke C., Bah B. & Lejeune P., 2008. *Carte Numérique des Sols de Wallonie – version 1.2. Convention financée par la Région Wallonne (DGA, MRW)*. Gembloux, Belgique : Unité Sol-Écologie-Territoire (Laboratoire de Géopédologie) et Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.

- Commission des Communautés européennes, 2006. *Stratégie thématique concernant l'utilisation durable des pesticides*. COM(2006) 372 final, non publié au Journal Officiel.
- Dubus I.G., Brown C.D. & Beulke S., 2003. Sources of uncertainty in pesticide fate modelling. *Sci. Total Environ.*, **317**, 53-72.
- Félix R. & Xanthoulis D., 2005. Analyse de sensibilité du modèle mathématique « *Érosion Productivity Impact Calculator* » (EPIC) par l'approche One-Factor-At-A-Time (OAT). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **9**, 179-190.
- 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.
- FOCUS, 2009. *Assessing potential for movement of active substances and their metabolites to ground water in the EU. Report of the FOCUS Ground Water Work Group*. EC Document Reference Sanco/13144/2010 version 1.
- FUSAGx & MRW-DGA, 2007. *Carte d'Occupation des Sols de Wallonie (COSW)*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (FUSAGx) ; Namur, Belgique : Ministère de la Région Wallonne - Direction générale de l'Agriculture (MRW-DGA).
- Legrain X., Bock L., Lejeune P. & Rondeux J., 2005. *Étude de faisabilité de la phase « révision partielle » du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW). Évaluation de la base de données Aardewerk. Note de la réunion du Comité d'Accompagnement du 14 septembre 2005*. Gembloux, Belgique : FUSAGx, Unité Sol - Écologie - Territoire, Laboratoire de Géopédologie, Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels.
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Directive Cadre sur l'Eau (DCE). *J. Off. Communautés Eur.*, **L 327**.
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2006. Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration. *J. Off. Union Eur.*, **L 372**, 19-31.
- Planchon V., 2007. *Détection de valeurs aberrantes dans des mélanges de distributions dissymétriques pour des ensembles de données avec contraintes spatiales*. Thèse de doctorat : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (Belgique).
- Rawls W.J., 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Sci.*, **135**, 123-125.
- SPW-DGARNE, 2010. *Tableau de bord de l'environnement wallon 2010*. Jambes, Belgique : Service Public de Wallonie (SPW), Direction Générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGARNE), Département de l'Étude du Milieu Naturel et Agricole (DEMNA), Direction de l'État environnemental (DEE), Cellule État de l'Environnement wallon.
- Stuber N., 2009. *A spatially distributed leaching model for Northern Belgium. Diploma thesis within the framework of geography studies*. Frankfurt am Main, Germany: Johann Wolfgang Goethe-University, Department of Physical Geography.
- Tiktak A., Boesten J. & Van der Linden T., 2002. Nationwide assessments of non-point source pollution with field-scale developed models: the pesticide case. In: Hunter G.J. & Lowell K.E., eds. *Proceedings of the 5th International symposium on spatial accuracy assessment, July 2002, Melbourne, Australia*, 17-30.
- Tiktak A., Van der Linden A.M.A. & Boesten J.J.T.I., 2003. *The GeoPEARL model. Model description, applications and manual*. RIVM report 716601007/2003. Bilthoven, The Netherlands: RIVM; Wageningen, The Netherlands: Alterra.
- Tiktak A. et al., 2004. Assessment of the pesticide leaching risk at the Pan-European level. The EuroPEARL approach. *J. Hydrol.*, **289**, 222-238.
- Tiktak A., Boesten J.J.T.I., Van der Linden A.M.A. & Vanclooster M., 2006. Mapping ground water vulnerability to pesticide leaching with a process-based metamodel of EuroPEARL. *J. Environ. Qual.*, **35**, 1213-1226.
- Tychon B. et al., 2000. *Prévision des productions végétales à l'échelle nationale basée sur un système intégré « Modèle agrométéorologique-Téledétection » : analyse de sensibilité et domaine de validité en tant qu'outil d'aide à la décision en politique agricole. Rapport final (Projet B-CGMS)*. Bruxelles : OSTC, Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture ; Mol, Belgique : VITO.
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898.
- Van Orshoven J., 1993. *Assessing hydrodynamic land qualities from soil survey data*. PhD thesis: Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit der Landbouwwetenschappen, Leuven (Belgium).
- Van Orshoven J. & Vandenbroucke D., 1993. *Guide de l'utilisateur de Aardewerk. Base de données de profils pédologiques. Rapport 18B*. Bruxelles : Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA), Comité pour le développement d'un système d'informations sur les sols belges (COBIS).
- Vanclooster M. et al., 2004. On the use of unsaturated flow and transport models in nutrient and pesticide management. In: Feddes R.A.E.A.E., ed. *Unsaturated zone modelling*. Wageningen Frontis Book series 6.

- Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 331-361.
- Vereecken H., 1988. *Pedotransfer functions for the generation of hydraulic properties for Belgian soils*. PhD thesis: Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit der Landbouwwetenschappen, Leuven (Belgium).
- Zhang H., Haan C.T. & Nofziger D.L., 1993. An approach to estimating uncertainties in modeling transport of solutes through soils. *J. Contam. Hydrol.*, **12**, 35-50.

(27 réf.)