

# L'hydrologie, une partenaire de la géomorphopédologie pour une gestion transéchelle des grands enjeux environnementaux

Aurore Degré, Catherine Sohier, François Colard, Nora Kummert, Alexandra Bauwens, Julie Rauw, Eléonore Beckers

Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité d'Hydrologie et Hydraulique agricole. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : Aurore.degre@ulg.ac.be

La zone insaturée du sol et du sous-sol est souvent qualifiée de zone critique, étant donné son rôle d'interfaçage entre les compartiments aérien et souterrain de notre environnement. Dans les thématiques du transfert des solutés ou de la conservation des eaux et des sols, les recherches d'hydrologie et d'hydraulique agricole s'appuient sur les informations pédologiques et ce, depuis une échelle extrêmement locale jusqu'à la vision régionale de la gestion environnementale. La dérivation des paramètres hydrodynamiques depuis les descriptions pédologiques des sols permet à l'hydrologue de quantifier et de représenter spatialement la dynamique des échanges eau-sol-végétation-atmosphère, les déplacements de l'eau dans le sol et la zone vadose ainsi que les déplacements et les transformations des solutés. Les recherches présentées ici couvrent la modélisation hydrologique physiquement basée à l'échelle régionale qui vise l'analyse prospective (au-delà de 2020) des mesures envisagées pour limiter les pollutions diffuses d'origine agricole, tout comme des modélisations physiques détaillées en sites expérimentaux. L'érosion hydrique des sols est un autre enjeu majeur de gestion environnementale. Le sol étant une ressource peu renouvelable, les techniques de conservation des sols et l'aménagement hydraulique des bassins versants ruraux nécessitent la plus grande considération. Elles sont un outil supplémentaire de limitation des apports au cours d'eau (tant en termes de sédiments qu'en termes de nutriments). Là encore, les descriptions pédologiques permettent de cibler les sols les plus sensibles. De plus, les cartes des sols qui incluent une interprétation géomorphologique permettent de confronter les modèles d'arrachement, de transport et de dépôt de sédiments aux observations des pédologues faites lors des premiers levés et actuellement en cours. On démontre ainsi que dans le contexte actuel et crucial de préservation des ressources eau et sol, l'hydrologie et la science du sol sont réaffirmées comme des partenaires forts de gestion des grands enjeux environnementaux. **Mots-clés.** Hydrologie, géomorphologie, pédologie, relations eau-sol-plante, érosion, nitrate, modèle de simulation, Belgique.

**Hydrology: a partner of geomorphopedology in the scope of a scale-through environmental management.** Unsaturated soil and subsoil are often called "critical zone" considering their major interfacing role in our environment. Dealing with solute transfer or water and soil conservation, hydrologic research relies on pedologic descriptions. It is the case from micro to macro scale analysis. Hydrodynamic parameters are derived from pedologic information on soil. They allow hydrologists to quantify and spatially describe the dynamic exchanges between water, soil, crops and atmosphere. The modelling of water and solute transfer through soil and vadose zone also needs them. The paper presents some research highlights on soil behaviour, hydrological modelling and forecasting under climate change. Erosion is another major topic. Soil is a poorly renewable resource. Soil conservation and soft hydraulic management in watersheds deserve more attention. They can help limiting nutrient and sediment transfer to surface water. Again, pedologic information is the starting point of conceptualization and modelling. Furthermore, the Soil Map of Belgium includes information on geomorphology and landscape descriptions which date from decades. They are of first importance to calibrate and validate detachment, transport and sedimentation models. In the current context of high environmental concern, it is demonstrated how hydrology and pedology have to be partners in order to deal with such major issues.

**Keywords.** Hydrology, geomorphology, soil sciences, water-soil-plant relationships, erosion, nitrate, simulation models, Belgium.

## 1. INTRODUCTION

Le sol et le sous-sol non saturés sont une zone critique d'interfaçage des différents compartiments de l'environnement, tant concernant les flux d'eau et leurs interactions avec la solution du sol que concernant les flux gazeux.

Chaque échelle de perception peut contribuer à une meilleure compréhension des processus intervenant au sein des systèmes eau-sol-plante. L'article présente succinctement un panel de technologies d'investigation utilisées au sein de l'Unité d'Hydrologie et Hydraulique agricole de Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège. Les activités de cette unité sont centrées sur le monitoring et la modélisation des flux d'eau, de solutés et de sédiments à différentes échelles. Les techniques de monitoring ou d'acquisition de données visent une meilleure perception et quantification des processus, tandis que les techniques de modélisation visent à représenter les systèmes afin de mener des études prospectives particulièrement nécessaires au vu des pressions environnementales présentes et à venir pesant sur les sols, l'atmosphère et les ressources en eau.

## 2. PHYSIQUE DES SOLS, PARTITION DES FLUX D'EAU, STRUCTURE

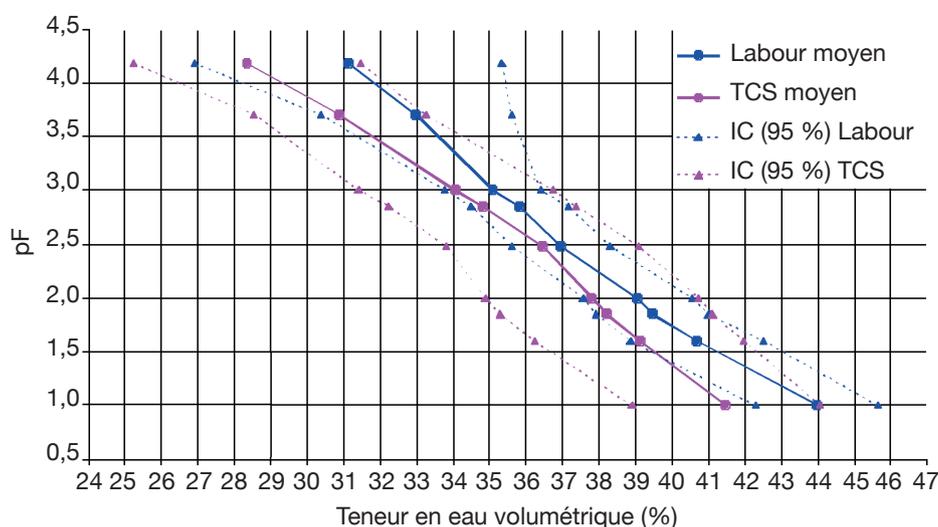
L'évolution des pratiques culturales vers une simplification des itinéraires techniques est en plein essor et conduit actuellement à des conclusions divergentes quant à leurs effets sur la porosité et les paramètres hydrodynamiques du sol (Cousin et al., 2004). Ce paragraphe aborde la comparaison de la structure du sol cultivé en fonction de l'itinéraire mécanique appliqué et cela, au moyen de deux techniques différentes : la mesure de la relation pression-teneur en eau et la microtomographie à rayons X (Beckers et al., 2010a).

Une étude a pris place sur un site d'essai long terme à Gentinnes (Brabant Wallon, Belgique) au sein duquel, depuis 2004, certaines parcelles sont travaillées en labour alors que d'autres le sont en travail cultural simplifié (TCS). Ce dernier consiste en un semis après déchaumage sur 10 cm. Le sol est de type

Aba(b)1, la rotation est betterave – froment d'hiver. Un échantillonnage de sols a été réalisé en mars 2010. Vingt échantillons en structure conservée ont été prélevés dans la partie supérieure de l'horizon Ap. Dix d'entre eux ont été scannés au microtomographe à rayons X [Skyscan-1172 high-resolution desk-top micro-CT system (Skyscan, Kontich, Belgium)]. La configuration de la caméra et la distance source-objet-caméra ont été ajustées pour obtenir une résolution de 17  $\mu\text{m}$ . Cette résolution permet de visualiser une gamme importante de tailles de pores reliés à la méso- ou à la macroporosité. La porosité a été analysée à travers des facteurs de distribution de la taille des pores, de leur orientation, connectivité, etc.

Les premiers résultats relatifs à l'analyse en deux dimensions montrent une différenciation de la distribution des pores de grande taille ( $D > 1000 \mu\text{m}$ ) en fonction de l'orientation des coupes en TCS, tandis qu'aucune tendance nette ne se dégage pour le labour. L'analyse en trois dimensions a permis de nuancer ces résultats. Il semble en effet que la porosité en labour soit plus développée verticalement et, en TCS, au contraire, plus horizontalement. De plus, le degré d'anisotropie est globalement plus élevé pour le labour que pour le TCS. Par ailleurs, la connectivité du réseau poral apparaît plus importante en labour qu'en TCS (Beckers et al., 2010b).

La deuxième moitié des échantillons a permis l'obtention des courbes de pF présentées à la **figure 1** (appareil de Richards jusqu'à un pF de 4,2). Ici aussi, les résultats font preuve d'une grande variabilité en labour, tandis que le comportement des échantillons en TCS est beaucoup plus homogène. Ces courbes de

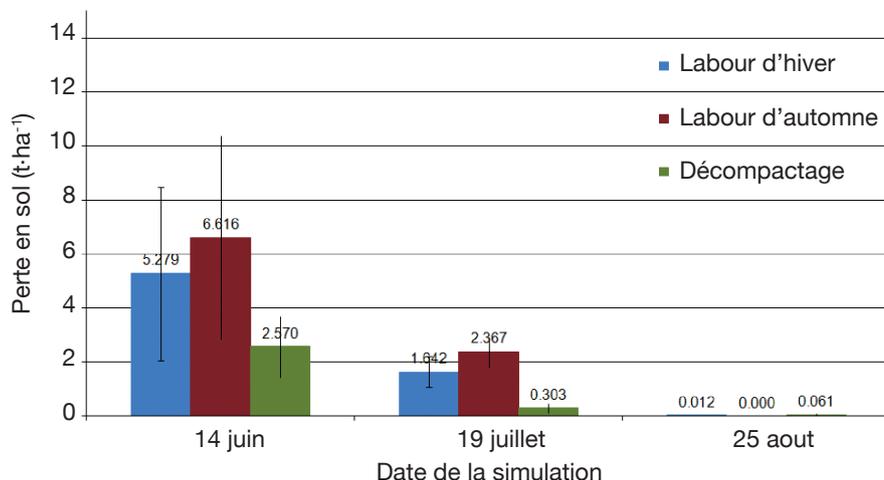


**Figure 1.** Comparaison des courbes de rétention selon deux itinéraires techniques : technique culturale simplifiée (TCS) et labour (n = 5) — *Comparison of retention curves depending on two agricultural practices: conservationnals technics (TCS) and ploughing (n = 5).*

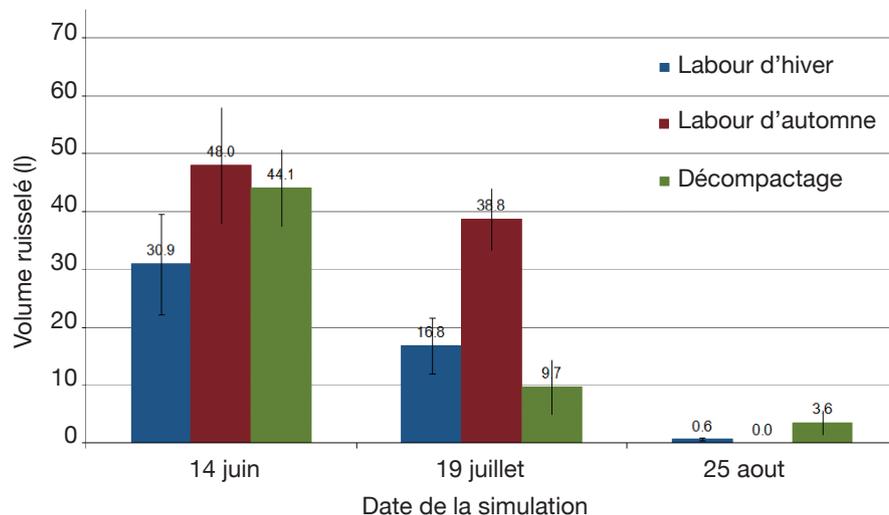
rétenion nous permettent par ailleurs de constater que la réserve utile pour la plante est significativement plus importante en TCS dans l'horizon Ap. Cette mesure est corroborée par des constatations effectuées sur le terrain lors de la culture de betteraves qui montrait une meilleure rétenion d'eau en surface sur les parcelles en TCS. Il semblerait donc que la méso- et la macroporosité soient favorisées pour les horizons superficiels du sol en TCS.

Le rôle joué par la structure du sol dans la partition des flux entre infiltration et ruissellement et dans la limitation de l'érosion hydrique peut également être estimé à l'échelle de parcelles expérimentales. Kummert et al. (2010) ont présenté des mesures réalisées sous simulation de pluie érosive (80 mm·h<sup>-1</sup> pendant 30 min) dans une parcelle de sol limoneux emblavée en betterave avec différents itinéraires techniques (labour d'hiver, labour d'automne et décompactage) (**Figures 2 et 3**).

Les résultats préliminaires confirment un intérêt du décompactage (sans labour) pour limiter les pertes en terres mais montrent également que cette technique produit davantage de ruissellement que les techniques traditionnelles de labour. Ces mesures réalisées durant une première année de reconversion de l'itinéraire technique doivent être confirmées par des essais complémentaires, mais elles montrent que l'itinéraire technique et la structure du sol ont un rôle potentiel à jouer dans la lutte contre l'érosion hydrique et le ruissellement, ces rôles pouvant être contradictoires.



**Figure 2.** Perte en sol moyenne sous simulations de pluie érosive sous trois itinéraires techniques : labour d'hiver, labour d'automne et décompactage (sol limoneux, culture de betterave, année 2010) — *Mean soil losses under rainfall simulation for three different agricultural practices : winter ploughing, autumn ploughing and decompaction (loamy soil, sugar beet, year 2010).*



**Figure 3.** Volume moyen de ruissellement sous simulations de pluie érosive sous trois itinéraires techniques : labour d'hiver, labour d'automne et décompactage (sol limoneux, culture de betterave, année 2010) — *Mean runoff volume under rainfall simulation for three different agricultural practices : winter ploughing, autumn ploughing and decompaction (loamy soil, sugarbeet, year 2010).*

### 3. HYDROLOGIE DU SOL ET DU SOUS-SOL, SYSTÈMES EAU-SOL-PLANTE

La prise en compte des végétaux est un élément indispensable pour la compréhension des phénomènes hydrologiques de surface et de sub-surface (Drogue et al., 2010). L'utilisation d'un modèle hydrologique physiquement basé permet de représenter l'hydrologie du continuum eau-sol-plante-atmosphère et de mettre en évidence, notamment, les effets de modification des conditions externes sur le fonctionnement de ce système (exemple : changement climatique).

Dans le cadre du projet Interreg IVB AMICE (*Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolution*), une modélisation hydrologique de deux sous-bassins versants de la

Meuse en région wallonne (la Vesdre et la Lesse) a été réalisée d'une part, en situation actuelle (1971-2005) et d'autre part, avec un forçage climatique au niveau des températures et de la pluviométrie (Baguis et al., 2010) visant à refléter l'évolution possible du climat à l'horizon 2020-2050 et à l'horizon 2070-2100.

Si l'on considère l'hypothèse que l'occupation du sol et les types de cultures restent identiques à leur état actuel jusqu'à la fin du siècle, il est possible d'isoler l'effet du changement climatique sur la partition des flux entre l'évapotranspiration réelle, le ruissellement direct, les transferts hypodermiques et la percolation de base (**tableaux 1 et 2**).

Ces bilans, réalisés à l'échelle du bassin versant et qui moyennent plus de 30 années de modélisation journalière, montrent notamment une diminution sensible de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui pourrait atteindre de 16 à 17 % par an (respectivement pour la Vesdre et la Lesse) à l'horizon 2070-2100 pour le scénario sec. Ces bilans masquent une variabilité journalière et interannuelle qui est présentée aux **figures 4a et 4b**.

Il apparaît que le profil annuel de l'évapotranspiration réelle est significativement modifié par la prise en compte d'un forçage climatique. À l'horizon 2070-2100, l'ETR indique que les végétaux reprennent

plus tôt leur activité au cours du printemps. Il apparaît également que la répartition « en cloche » de l'ETR au cours de l'année devient une répartition bimodale avec un premier pic d'activité autour du jour 150 (~20 mai) et un second pic d'activité autour du jour 270 (~27 septembre). Un creux d'activité a lieu fin août. Il est essentiellement dû au stress hydrique consécutif d'une forte diminution des précipitations en été conjointe à une augmentation de la demande climatique (hausse de la température) et au fait que les cultures ont présenté un développement plus rapide en début de saison.

Ces modifications du bilan hydrologique et de la dynamique du système eau-sol-plante conduisent également à des effets tangibles sur la qualité de l'eau et particulièrement, la qualité de la recharge des aquifères. Considérant, comme précédemment, que toutes autres choses que le climat restent inchangées dans les années à venir, on peut simuler le devenir des concentrations en nitrate de la solution du sol aux prochaines échéances de la Directive Cadre sur l'Eau. Cette modélisation repose sur un modèle hydrologique physiquement basé documenté dans Sohier et al. (2009) et Sohier et al. (2010).

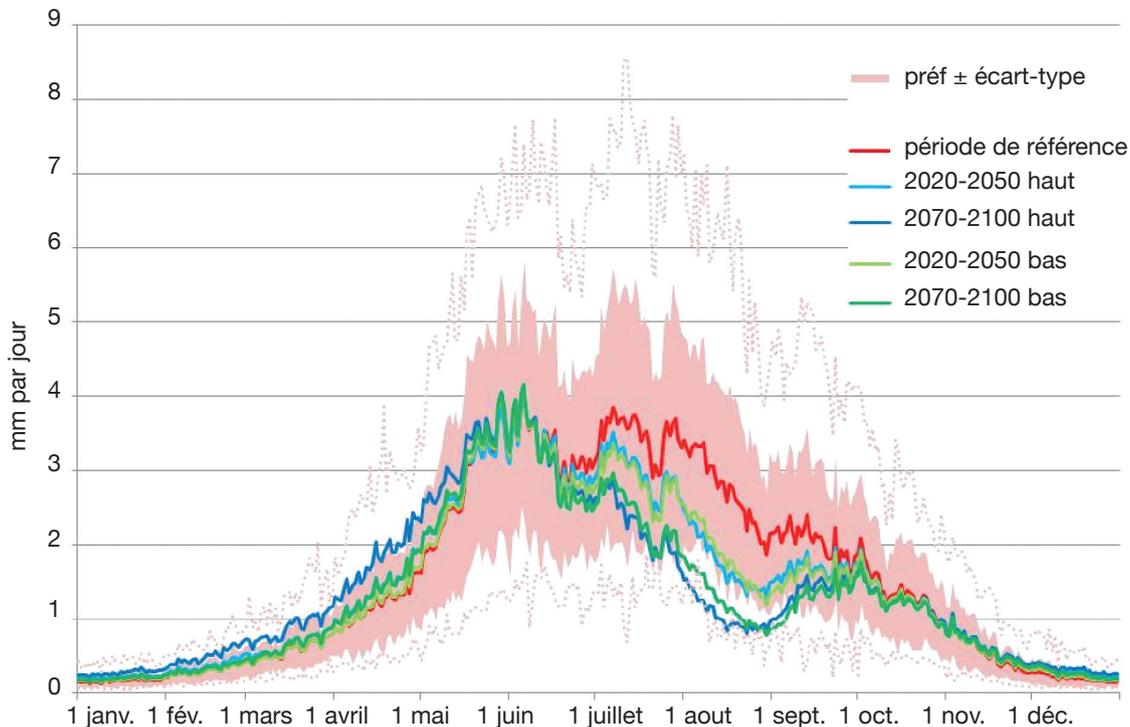
La **figure 5** présente les profils de concentration attendus dans le sol et la zone vadose jusqu'à l'horizon

**Tableau 1.** Bilan hydrologique actuel du bassin versant de la Vesdre [moyenne annuelle sur base des flux journaliers (1971-2005)] et perspectives d'évolutions pour les périodes 2020-2050 et 2070-2100, scénarios haut et bas — *Hydrologic balance of the Vesdre catchment [mean annual value based on daily flow simulation (1971-2005)] and evolution for 2020-2050 and 2070-2100 time slices, high and low impacts scenarios.*

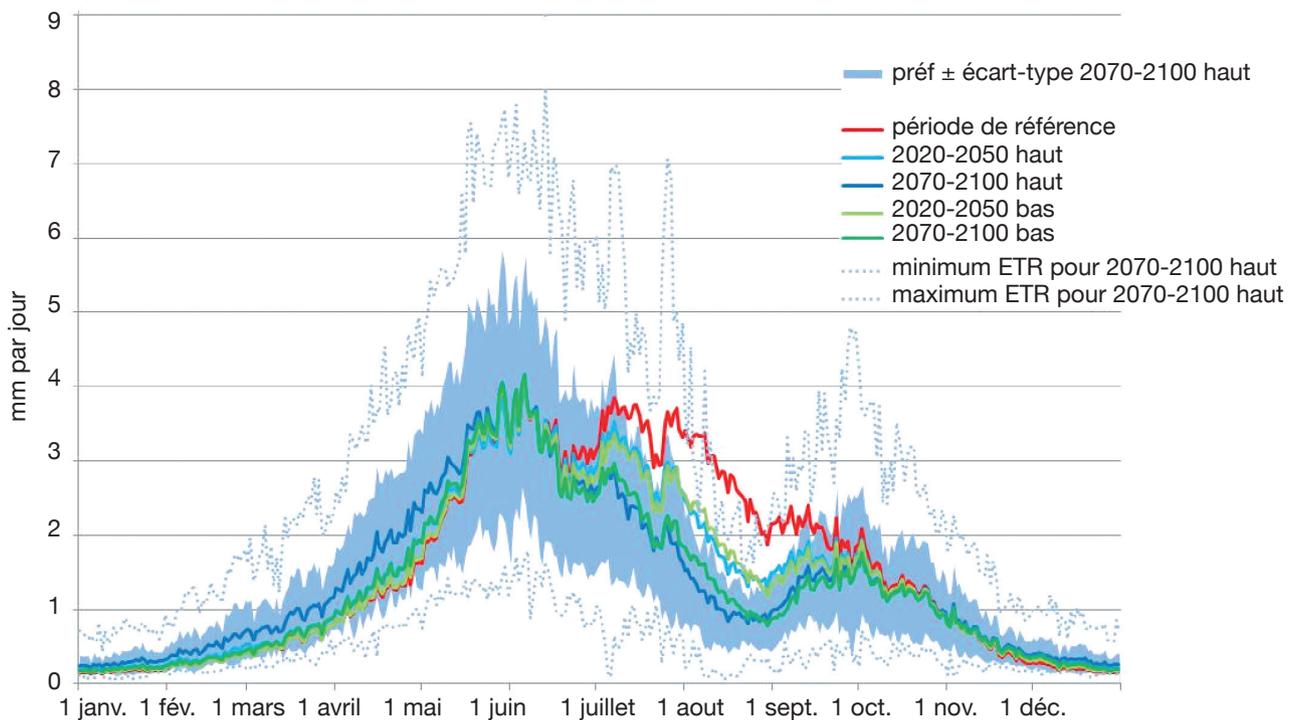
	Qsim (mm par an)	2020-2050		2070-2100	
		Humide	Sec	Humide	Sec
Pluie	1 110	3 %	-12 %	4 %	- 19 %
Ruissellement direct	226	14 %	-14 %	19 %	- 23 %
Hypodermiques lents	195	18 %	-12 %	25 %	- 21 %
Percolation	109	11 %	-10 %	13 %	- 19 %
Évapotranspiration réelle	573	- 8 %	-11 %	- 11 %	- 17 %

**Tableau 2.** Bilan hydrologique actuel du bassin versant de la Lesse [moyenne annuelle sur base des flux journaliers (1971-2005)] et perspectives d'évolution pour les périodes 2020-2050 et 2070-2100, scénarios haut et bas — *Hydrologic balance of the Lesse catchment [mean annual value based on daily flow simulation (1971-2005)] and evolution for 2020-2050 and 2070-2100 time slices, high and low impacts scenarios.*

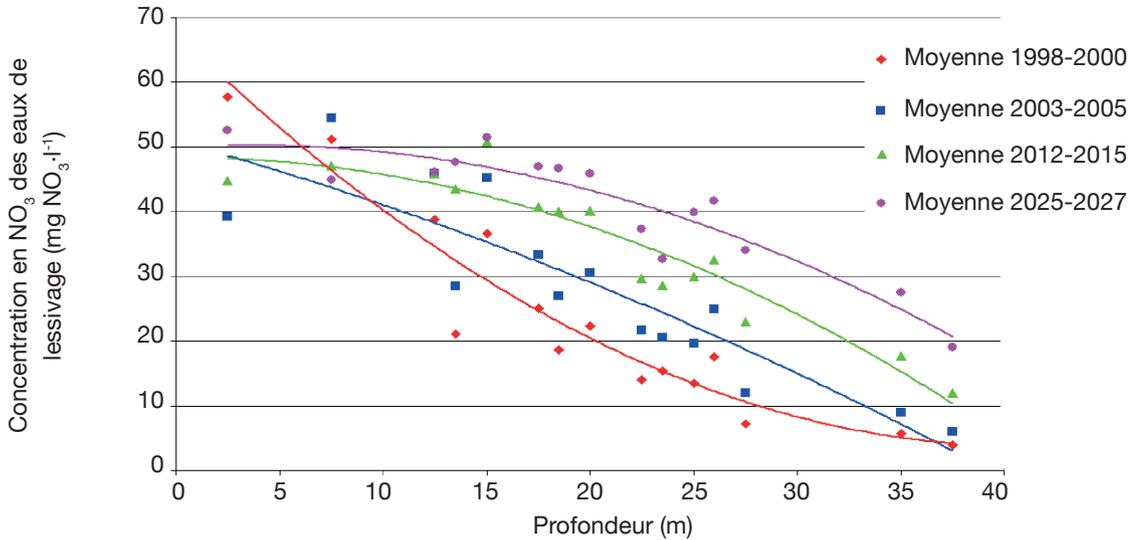
	Qsim (mm par an)	2020-2050		2070-2100	
		Humide	Sec	Humide	Sec
Pluie	1 016	4 %	- 11 %	5 %	- 19 %
Ruissellement direct	164	16 %	- 12 %	24 %	- 20 %
Hypodermiques lents	248	18 %	- 14 %	25 %	- 23 %
Percolation	62	3 %	- 11 %	4 %	- 17 %
Évapotranspiration réelle	539	- 7 %	- 9 %	- 10 %	- 16 %



**Figure 4a.** Évolution annuelle de l'évapotranspiration réelle (période de référence 1971-2005) et périodes futures, scénarios haut et bas (arrière-plan : min, max et écart-type de la période de référence) sur le bassin versant de la Vesdre — *Annual variation of actual evapotranspiration (reference period 1971-2005) and future time slices, high and low impacts scenarios (background: min max and standard deviation of the reference period) in Vesdre watershed.*



**Figure 4b.** Évolution annuelle de l'évapotranspiration réelle (période de référence 1971-2005) et périodes futures, scénarios haut et bas (arrière-plan : min max et écart-type de la période 2070-2100 scénario haut) sur le bassin versant de la Vesdre — *Annual variation of actual evapotranspiration (reference period 1971-2005) and future time slices, high and low impacts scenarios (background: min max and standard deviation of the 2070-2100 period scenario high) in Vesdre watershed..*



**Figure 5.** Profils de concentration en nitrate de la solution du sol, moyennes 1998-2000, 2003-2005, 2012-2015 et 2025-2027 selon un scénario de changement climatique « haut », pratiques agricoles 2005 — *Nitrate concentration profiles, mean values 1998-2000, 2003-2005, 2012-2015 and 2025-2027 under “high impacts” climate change scenario, agricultural practices 2005.*

2027 considérant une évolution climatique selon le scénario humide (Baguis et al., 2010). L’hypothèse de constance des pratiques agricoles dans le temps se marque dans les premiers mètres du profil où la concentration a tendance à se stabiliser. En profondeur en revanche, la tendance est à la hausse. Elle fait suite au transfert progressif des ions nitrate dans la zone non saturée du sous-sol. On peut leur attribuer une vitesse de 1 m par an dans les limons (Sohier et al., 2009).

Cette figure suggère qu’une « dette nitrate » existe dans nos sous-sols et que les concentrations de l’eau de recharge (dans la situation présentée ici, la recharge a lieu à plus de 35 m sous la surface) seront encore en augmentation dans les années à venir dans les aquifères profonds, quelles que soient les pratiques agricoles menées en surface. Ce retard est conditionné par le type de sol et de sous-sol et par l’épaisseur de la couche non saturée. De plus, le scénario humide considéré ici induit une augmentation du lessivage dû à des périodes de saturation temporaire plus longues en automne et en hiver.

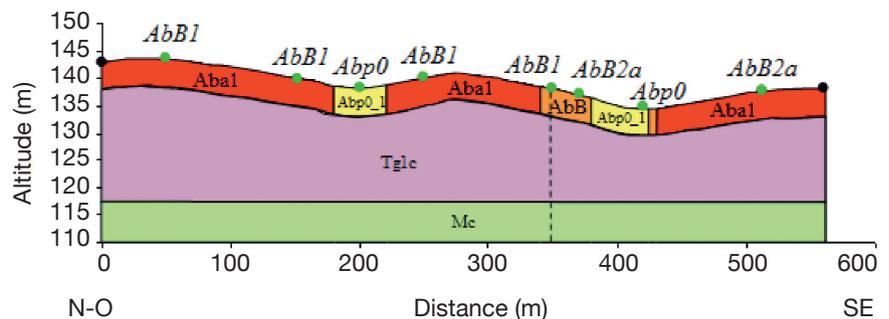
**4. HYDROLOGIE DES VERSANTS**

Le sol est également un continuum spatial et les interactions qu’il entretient avec l’eau et les végétaux sont influencées par sa position dans le paysage. En termes d’éro-

sion hydrique, les flux de surface vont déterminer les détachements, transports et dépôts de sédiments dans les versants. À long terme, ces déplacements peuvent induire des modifications de la morphologie des versants.

L’actualisation en cours de la Carte des Sols de la Belgique (Legrain et al., 2011b) a un potentiel remarquable pour l’étude de l’érosion qui a eu lieu entre le levé initial et la situation actuelle. En effet, sur base des relevés pédologiques systématiques effectués depuis 1947, des unités cartographiques ont été identifiées à l’échelle du 1/20000.

De nouvelles observations pédologiques, à l’heure actuelle, présentent des résultats différents des observations réalisées il y a plusieurs dizaines d’années. Un exemple est présenté en **figure 6**. Dans les



**Figure 6.** Exemple de toposéquence présentant les unités cartographiques de la CNSW (levé en 1957) et les observations de terrain réalisées en 2010 (points verts) (Rauw, 2010), graphisme A. Liénard — *Toposequence showing differences between 1957 soil survey and 2010 observations (green dots) (Rauw, 2010), graphism A. Liénard.*

versants, des zones présentent des profils d'érosion là où le symbole du développement de profil ne signalait pas une érosion. Dans les vallons, des zones de dépôts plus profonds ou des dépôts plus étendus peuvent être observés (Legrain et al., 2011a).

Ces observations représentent un gisement de données potentielles pour la validation des modèles de quantification des pertes en terre par érosion hydrique, ainsi que des modèles qui représentent l'évolution de la morphologie des versants. Les perspectives ainsi ouvertes sont nombreuses et couvrent tant des domaines de conservation des sols que de l'aménagement des territoires.

## 5. MODÉLISATION BASSIN VERSANT

La modélisation hydrologique du continuum sol-plante-atmosphère peut enfin être couplée à un système

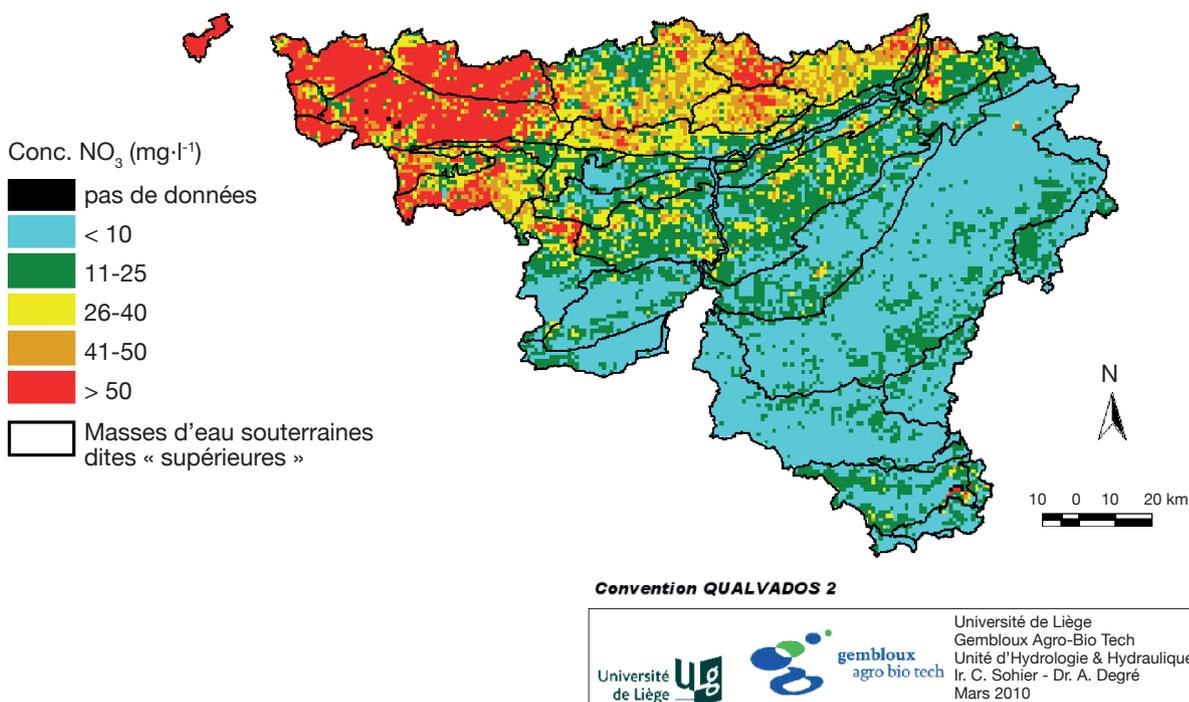
d'information géographique et aux différentes bases de données spatiales nécessaires à son fonctionnement. Le modèle EPICgrid (Sohier et al., 2009) développé à Gembloux Agro-Bio Tech utilise les bases de données reprises au **tableau 3**. Il est spatialisé sur base d'une grille régulière de mailles carrées de 1 km de côté.

Le modèle hydrologique EPICgrid permet un calcul journalier des flux d'eau et de nutriments maille par maille sur tout le territoire de la région wallonne et peut, par agrégation spatiale et/ou temporelle, fournir des résultats synthétiques aux différentes unités de rapportage que sont les masses d'eau de surface ou souterraine (Cellule État de l'Environnement Wallon, 2007 ; Sohier et al., 2010).

La prise en compte de différents scénarios climatiques ou de modifications des pratiques ou encore de l'évolution de l'occupation du sol sont envisageables. À titre d'exemple, la **figure 7** présente la concentration en nitrate des eaux de lessivage à une

**Tableau 3.** Bases de données spatiales du modèle EPICgrid — *Geodatabases of the EPICgrid model.*

Données	Références
Sol	Maréchal et al., 1971
Géologie	Laime et al., 1995 ; Hallet et al., 2007
Occupation du sol	Carte Numérique d'Occupation des Sols de Wallonie (CNOSW)
Pratiques agricoles	Borgers et al., 2007
Modèle numérique de terrain	Laime et al., 1995



**Figure 7.** Concentration en nitrate de la solution du sol à 1,5 m (moyenne 2000-2005) de la partie sud de la Belgique — *Nitrate concentration at 1.5 m depth (mean value 2000-2005) of Southern Belgium.*

profondeur fixe de 1,5 m sous la surface du sol (valeur moyenne 2001-2005). Cet azote est en grande partie perdu pour la végétation et sera transféré vers les eaux souterraines. Cet indicateur fournit une information rapide relative aux performances environnementales des pratiques agricoles menées en surface durant les mois qui précèdent.

Le nord du sillon Sambre et Meuse apparaît subir une pression nettement plus importante que le reste de la région wallonne. Il s'agit en effet de la ceinture limoneuse, dont les superficies agricoles sont consacrées essentiellement aux cultures intensives.

Sur base de ces résultats à 1,5 m de profondeur, les meilleures pratiques agricoles dans un contexte donné peuvent être identifiées et encouragées. En cela, la modélisation hydrologique régionale proposée par EPICgrid est un outil d'aide à la décision unique en Europe (Sohier et al., 2010).

Il permet d'aller plus loin encore grâce à l'intégration dans le modèle de la zone vadose, soit la zone de sous-sol non saturé qui fait lien entre la zone racinaire et les eaux souterraines.

Cette représentation permet de cartographier les concentrations en nitrate de l'eau de recharge des nappes, prenant en compte l'historique des pratiques agricoles et des conditions météorologiques en surface ainsi que le temps de transfert dans la zone vadose (Sohier et al., 2009). La **figure 8** illustre l'information ainsi produite.

## 6. CONCLUSION

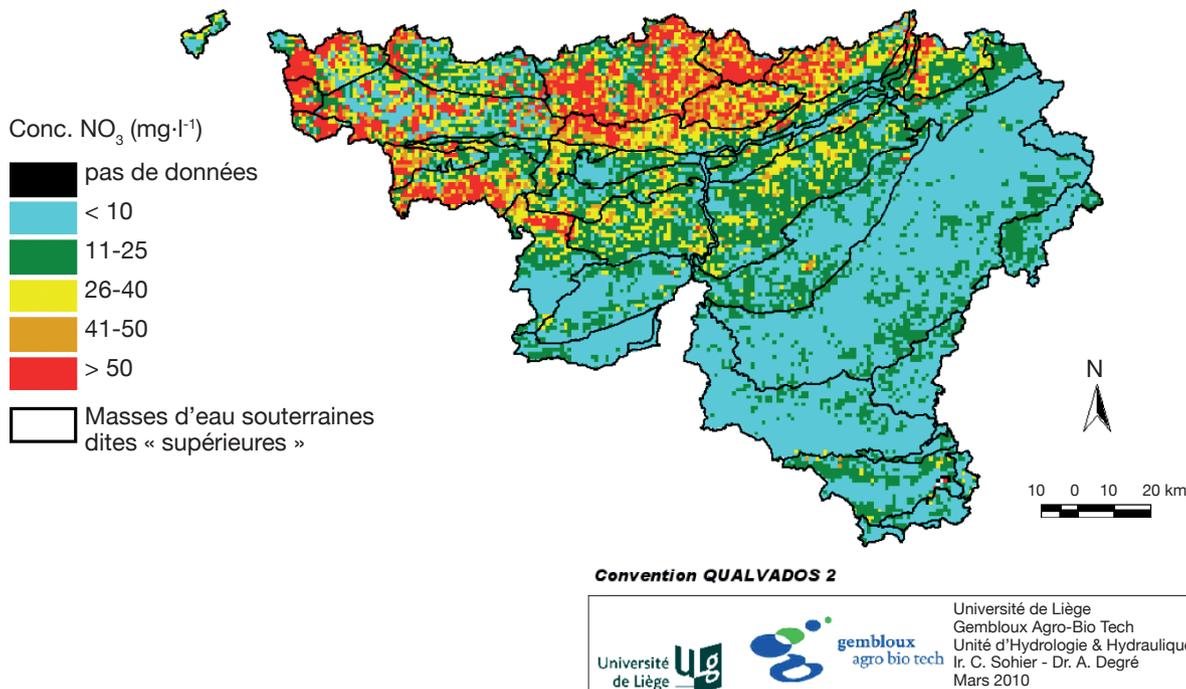
Au travers des applications et exemples présentés, l'importance et la complexité des interactions entre l'eau, le sol et la végétation ont été démontrées. Il importe de considérer le sol, l'eau et le vivant en tant que système pour espérer progresser dans la compréhension et la quantification du rôle d'interfaçage que joue le sol. Nous avons montré quelques-uns des enjeux environnementaux dans lesquels hydrologie et pédologie sont intimement liés.

L'hydrologie s'appuie sur la pédologie pour comprendre et quantifier l'infiltration, le ruissellement, l'érosion, les dépôts, les transformations de solutés, leurs transferts. Ces phénomènes sont dynamiques, dépendants du climat, de la végétation et des pratiques humaines.

Le sol n'est pas une matrice figée. S'il porte en lui les traces d'évènements anciens (glaciations, submersion, etc.), il est également modifié jour après jour par les racines, la micro-faune, les mouvements de l'eau ainsi que par les pratiques agricoles. Sa caractérisation dynamique reste à développer.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les organisateurs de la 3<sup>e</sup> Journée d'Étude du Projet de Cartographie Numérique



**Figure 8.** Concentration en nitrate des eaux de lessivage à proximité des nappes de base (moyenne 2000-2005) de la partie sud de la Belgique — Nitrate concentration near groundwater (mean value 2000-2005) of Southern Belgium.

des Sols de Wallonie (PCNSW) ; les bailleurs de fonds de différentes recherches présentées dans cet article : le programme Interreg IVB (projet AMICE), la SPGE (projet QualVados), le Service Public de Wallonie (Projet GISER, ClimEro) ainsi que le CRA-W, la ferme de la Faculté de Gembloux et l'asbl Greenotec pour leur participation aux essais de terrain.

## Bibliographie

- Baguis P., Roulin E., Willems P. & Ntegeka V., 2010. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. *Theor. Appl. Climatol.*, **99**(3-4), 273-286.
- Beckers E., Ly S., Degré A. & Léonard A., 2010a. Comparison of agricultural soils' structure depending on tillage system using X-ray microtomography. *Geophys. Res. Abstr.*, **12**.
- Beckers E., Roisin C., Léonard A. & Degré A., 2010b. Évolution des structures de sols sous itinéraires techniques contrastés : relation entre courbes de rétention et analyse par microtomographie aux rayons X. In : *35<sup>e</sup> journées du GFHN, 24-25 novembre 2010, Louvain-la-Neuve, Belgique*. Louvain-la-Neuve, Belgique : Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute.
- Borgers N., Vandenberghe C. & Marcoen J.M., 2007. *Des pratiques agricoles aux reliquats en azote nitrique des sols en région wallonne. Collaboration scientifique entre l'Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole et le Groupe de Recherche en Environnement et Ressources Azotées dans le cadre de l'Évaluation des mesures prises pour réduire les incidences de la pollution diffuse d'origine agricole et domestique sur la qualité des masses d'eau de surface et souterraines de la région wallonne à l'aide du modèle EPICgrid-PIRENE (Convention RW-SPGE)*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Cellule État de l'Environnement Wallon, 2007. *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*. Namur, Belgique : DGRNE, MRW.
- Cousin I., Vogel H.J. & Nicoullaud B., 2004. Influence de la structure du sol à différentes échelles sur les transferts d'eau. Conséquence d'une réduction du travail du sol. *Étude Gestion Sols*, **11**(1), 69-81.
- Drogue G. et al., 2010. *Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse basin: WPI report - Action 3*, <http://hdl.handle.net/2268/68472>, (17/02/2011).
- Hallet V. & Barbier F., 2007. *Étude bibliographique visant à préciser le cadre géologique et hydrogéologique au droit des mailles du modèle EPICgrid. Convention de sous-traitance entre la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux et les Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur*. Namur, Belgique : Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix.
- Kummert N., Beckers E., Roisin C. & Degré A., 2010. Assessing structure potential in soil and water conservation: monitoring top soil hydrology from micro to field scale. In: Wollesen de Jonge L., Moldrup P. & Lindblad Vendelboe A., eds. *1<sup>st</sup> International conference and exploratory workshop on soil architecture and physico-chemical functions "CESAR", 30/11-2/12/2010, Tjele, Denmark*.
- Laime S. & Dautrebande S., 1995. *Projet pilote CARHY. Ministère wallon de l'équipement et des transports. Services fédéraux des affaires scientifiques techniques et culturelles. Programme de recherche dans le domaine de la télédétection par satellite – phase III*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Legrain X. et al., 2011a. Soil redistribution in rural catchment: how fifty years old soil survey can help model improvement. *Geophys. Res. Abstr.*, **13**.
- Legrain X., Demarcin P., Colinet G. & Bock L., 2011b. Cartographie des sols en Belgique : aperçu historique et présentation des travaux actuels de valorisation et de révision de la Carte Numérique des Sols de Wallonie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(S2), 647-656.
- Maréchal R. & Tavernier R., 1971. Planche 11B : Pédologie – Associations de sols. In : Commission de l'Atlas, Comité National de Géographie, éd. *Atlas de Belgique*. Bruxelles : Institut Géographique Militaire.
- Rauw J., 2010. *Gestion de l'érosion à l'échelle du bassin versant. Quantification, apport de la géomorphopédologie et exploitation de logiciels libres*. Mémoire : Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique).
- Sohier C., Degré A. & Dautrebande S., 2009. From root zone modelling to regional forecasting of nitrate concentration in recharge flows. The case of the Walloon Region (Belgium). *J. Hydrol.*, **369**(3-4), 350-359.
- Sohier C. & Degré A., 2010. Modelling the effects of the current policy measures in agriculture: an unique model from field to regional scale in Walloon region of Belgium. *Environ. Sci. Policy*, **13**(8), 754-765.

(16 réf.)

