

Sensibilité d'un modèle agro-hydrologique à la cartographie des sols :

Test d'une méthode basée sur l'indice topographique et la lithologie

F. Laurent₍₁₎ et J.-P. Rossignol₍₂₎

(1) UMR Espaces Géographiques et Sociétés, Université du Maine, avenue Olivier Messiaen 72085 Le Mans Cedex 9

(2) UMR SAGAH (Sciences Agronomiques appliquées à l'Horticulture), Institut National d'Horticulture, 2 rue Le Nôtre 49045 Angers cedex 01

RÉSUMÉ

Les sols ont un rôle déterminant dans les flux de polluants. Leur prise en compte s'avère indispensable pour l'évaluation des risques de pollution, mais les cartes de sols manquent à des échelles adaptées et sur des surfaces étendues, ce qui constitue un frein majeur à cette intégration. Nous présentons une méthode de cartographie des propriétés des sols à partir de variables prédictives facilement accessibles et d'observations de terrain. Les propriétés étudiées sont : la teneur en argile et en limons, la profondeur du sol, la réserve utile et la perméabilité moyenne du profil. En mobilisant les données topographiques et géologiques, cette approche permet de réduire les temps d'acquisition en appuyant la spatialisation des propriétés du sol sur ces variables. La méthode est appliquée à deux bassins versants de l'ouest de la France. Une analyse de la variance démontre la pertinence des classes réalisées. La cartographie des propriétés des sols obtenue est ensuite introduite dans le modèle agro-hydrologique SWAT. La comparaison des résultats des simulations entre l'emploi de la méthode proposée et l'emploi d'une carte des sols montre que la première permet de simuler correctement les phénomènes d'émission et de transfert des nitrates des zones cultivées vers les cours d'eau. Enfin, sur la zone d'étude, le modèle est peu sensible à la densité de points de sondage utilisés pour le calage de la méthode de cartographie.

Mots clés

Cartographie des sols, propriétés physiques des sols, réserve utile, pollution, modélisation hydrologique, SWAT, SIG, nitrate.

SUMMARY

SENSITIVITY OF AN AGRO-HYDROLOGICAL MODEL TO THE SOIL MAPPING:

Evaluation of a method based on the topographic index and lithology

The soils determine the pollutants transfers. The integration of the soil data is necessary to assess risks of pollution. However the soil maps are rarely available over large areas which constitutes a major limit to their use. We present a mapping method of soils properties from predictive factors easily available and field data. The studied properties are : clay and loam content, soil depth, AWC and hydraulic

conductivity. The proposed method reduces the time and the costs of survey by using the topographic and geological data within a GIS. The method is applied on two watersheds in the west of France. A variance analysis shows the relevance of the soil landscape relations. The resulting soil properties estimates are use as inputs of the agro-hydrologic model SWAT. It allows to satisfactorily simulate the phenomena of nitrate emission and transfer from the the cultivated zones to the stream.

Key-words

Soil mapping, soil physical properties, AWC, pollution, nitrogen, hydrologic modelling, SWAT, GIS.

RESUMEN**SENSIBILIDAD DE UN MODELO AGRO-HIDROLÓGICO A LA CARTOGRAFÍA DE LOS SUELOS:****Evaluación de un método basado sobre el índice topográfico y la litología.**

Los suelos juegan un papel determinante en los flujos de contaminantes. Su toma en cuenta es indispensable para la evaluación de los riesgos de contaminación, pero los mapas de suelos faltan a escalas adaptadas y sobre superficies extendidas, lo que constituye un freno mayor a esta integración. Presentamos una metodología de cartografía de las propiedades de los suelos a partir de variables de predicción fácilmente accesibles y de observación de campo. Las propiedades estudiadas son: contenido en arcilla y limos, profundidad del suelo, reserva hídrica útil y permeabilidad media del perfil. Movilizando los datos topográficos y geológicos, este enfoque permite reducir los tiempos de adquisición apoyándose la especialización de las propiedades del suelo sobre estas variables. Un análisis de la variación muestra la pertinencia de las clases realizadas. La cartografía de las propiedades de los suelos obtenida se introduce después en el modelo agro-hidrológico SWAT. Permite simular correctamente los fenómenos de emisión y de transferencia de los nitratos de las zonas cultivadas hacia los ríos.

Palabras claves

Cartografía de suelos, modelización hydrologica, contaminación, SWAT, propiedades físicas de los suelos, nitratos, SIG.

En France, de nombreuses ressources en eau sont menacées par les pollutions diffuses d'origine agricole. Ces pollutions sont déterminées par les activités humaines responsables de leur émission dans le milieu et par l'aptitude du milieu à les transférer ou à les réduire. Le sol constitue un compartiment essentiel dans le cycle de l'eau. La connaissance de ses caractéristiques est donc primordiale pour le diagnostic de risques et pour le choix d'actions de protection des eaux.

Mais la cartographie des propriétés des sols à une échelle suffisante (du 1/50 000 au 1/250 000) ne couvre actuellement qu'une faible partie du territoire français. Notre propos est de définir une méthode simple et économe basée sur l'exploitation de données existantes extrinsèques (topographie et lithologie) et d'observations de propriétés intrinsèques des sols sur le terrain afin de cartographier les propriétés des sols. La pertinence de cette cartographie est analysée en l'exploitant dans le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

L'intégration des données pédologiques est indispensable aux diagnostics de risques de pollution diffuse. Mais, à notre connaissance, si la cartographie des sols à partir de données environnementales existantes a fait l'objet de différents travaux (Lagacherie *et al.*, 1995; Curmi *et al.*, 1996; Mc Kenzie and Ryan, 1999; Lagacherie and Voltz, 2000; Martin-Clouaire *et al.*, 2000; Carre, 2002; Walter, 2002; Bui and Moran, 2003; Mc Bratney *et al.*, 2003), la littérature s'intéresse encore assez peu à la sensibilité des modèles d'émissions et de transferts de polluants à la qualité des données utilisées (Zhu and Scott Mackay, 2001; Muttiah and Wurbs, 2002). Pour les sols, comme pour d'autres caractéristiques spatiales nécessaires (climat, occupation des sols, topographie), les données utilisées dans les applications sont soit créées spécifiquement sur le territoire étudié, soit issues de base de données existantes, sans mise en adéquation de la qualité des données aux besoins de la modélisation (Laurent *et al.*, 1998). Cependant, la disponibilité des données conditionne la mise en œuvre de diagnostics cohérents sur des territoires étendus et il nous paraît important de définir une méthode de cartographie permettant de réduire les temps et les coûts d'acquisition des données tout en représentant la variabilité spatiale des phénomènes.

Dans les travaux présentés ici, nous nous intéressons à l'identification de propriétés des sols à partir de données cartographiques existantes (la topographie et la lithologie) et d'observations de terrain. Puis, nous introduisons les informations sur les caractéristiques du sol dans le modèle agro-hydrologique SWAT afin de tester l'intérêt de la méthode pour le diagnostic des risques de pollution des eaux. Nous comparerons les résultats à ceux issus d'une carte des sols et nous nous intéresserons à la sensibilité du modèle à la densité de points de sondages mobilisés pour caler la méthode de cartographie. La méthode de cartographie a été présentée une première fois dans la revue EGS en décembre 2003 (Laurent et Rossignol, 2003). Dans la contribution présente, d'une part nous la modifions en considérant l'indice topographique comme facteur explicatif et l'élargissons à d'autres propriétés, d'autre part nous mon-

Carte 1 - Situation des bassins tests dans les Pays de la Loire
Map 1 - Studied area in the Pays de la Loire, France



trons l'intérêt qu'elle représente pour alimenter en données un modèle agro-hydrologique. La synthèse bibliographique est contenue dans la contribution de 2003.

ZONES D'ÉTUDE

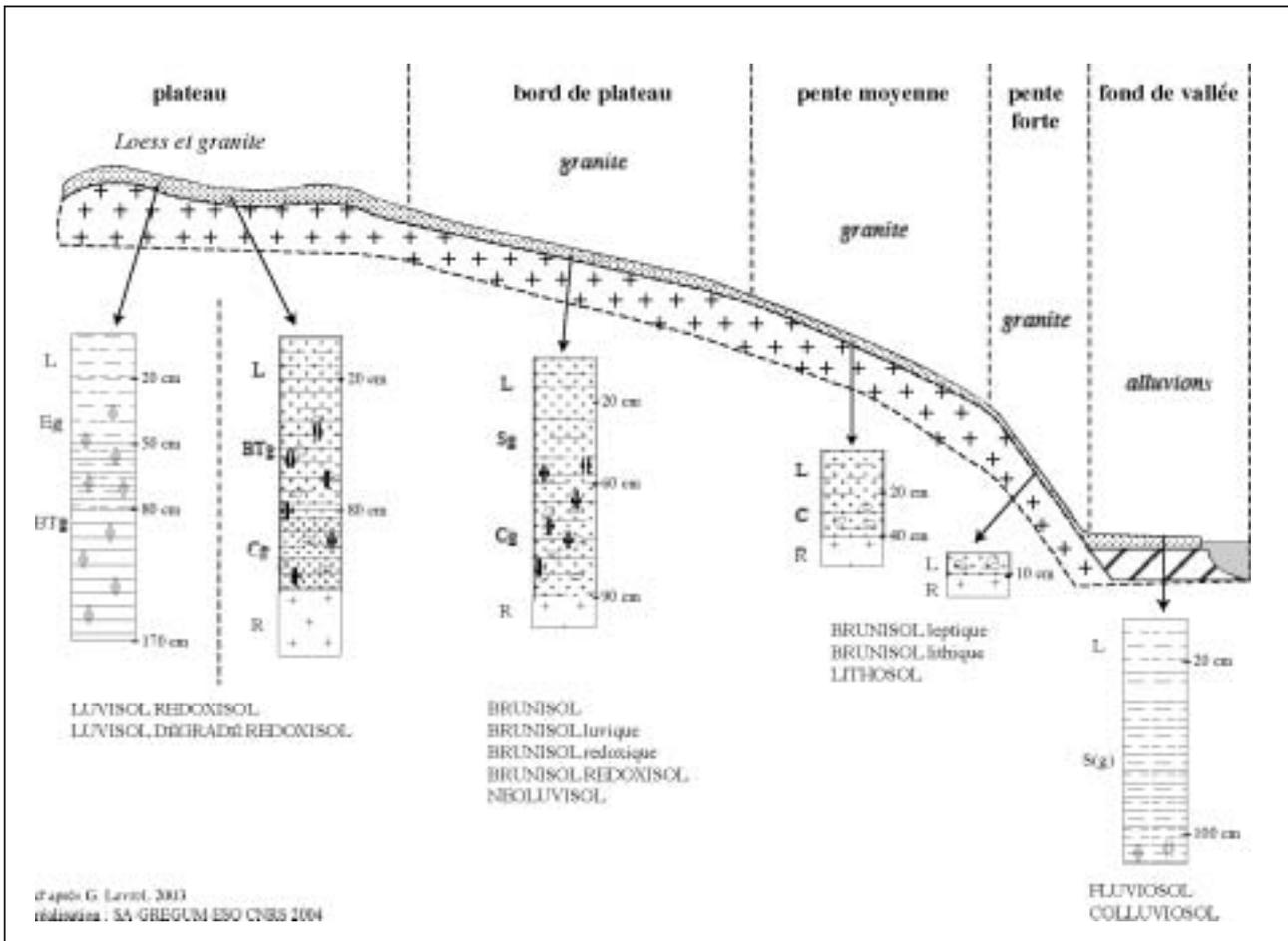
La méthode est testée sur deux bassins versants de l'ouest de la France : la Moine, affluent de la Sèvre Nantaise, et le Rochereau, cours d'eau en amont du Grand Lay (*carte 1*). Le substratum de leur bassin versant est formé par le socle paléozoïque armoricain constitué de roches variées d'origines plutonique, volcanique, métamorphique ou sédimentaire. La morphologie ondulée est celle d'un plateau incisé par les cours d'eau. Le paysage correspond à un bocage dégradé occupé par des prairies, du blé, du maïs, quelques forêts et par l'urbanisation de Cholet sur la Moine et de Pouzauges sur le Rochereau (*tableau 1*).

En 2002 et 2003, une carte des sols a été réalisée sur chaque bassin au 1/50 000 (Euriat and Tritz, 2002; Levrel, 2003). Les sols montrent clairement une distribution spatiale selon la topographie avec : des LUVISOLS redoxiques et LUVISOLS - REDOXISOLS sur les plateaux, des BRUNISOLS sur les pentes des vallées incisées par les cours d'eau et des FLUVIOSOLS et des COLLUVIOSOLS dans le fond des vallées (Baize and Girard, 1995). L'organisation des sols selon la topographie est illustrée par la toposéquence sur granite en *figure 1*.

Les enjeux sur la qualité de l'eau sont importants pour ces deux bassins versants car les eaux superficielles y sont captées dans des barrages pour l'alimentation en eau potable. Les concentrations en

Figure 1 - Toposéquence des sols sur substrat granitique sur le Rochereau (Levrel, 2003)

Figure 1 - Soil toposéquence on granite, Rochereau watershed (Levrel, 2003)



nitrate connaissent de fréquents dépassements des normes sur le Rochereau (SIAEP, 1999; Berthelot, 2002), elles sont beaucoup moins élevées sur la Moine qui souffre surtout de problèmes d'eutrophisation liés aux flux de phosphore, principalement d'origine agricole (pour la zone en amont de Cholet) (CALLIGEE, 1998).

MÉTHODOLOGIE

La méthode de cartographie repose sur l'exploitation de variables prédictives facilement accessibles et sur un calage des relations entre ces dernières et les propriétés des sols par des observations de terrain. Elle se décompose en quatre phases (figure 2):

1. réalisation de sondages à la tarière et de profils pédologiques, description de certaines caractéristiques du sol;
2. estimation de propriétés des sols selon des fonctions de pédo-transfert;
3. analyse spatiale et statistique des relations entre les caracté-

ristiques des sondages et les données cartographiques sur la géologie (lithologie) et la topographie;

4. cartographie des propriétés des sols.

Ces quatre phases sont répétées avec différentes densités de points de sondages afin de déterminer la sensibilité de la méthode.

Enfin, lors d'une cinquième phase, la carte des propriétés des sols selon les combinaisons de classes d'indice topographique et de lithologie est introduite dans le modèle agro-hydrologique, après agrégation spatiale.

Mesures de terrain

Les propriétés des sols des bassins versants sont identifiées par des sondages à la tarière. 945 sondages et 20 fosses pédologiques ont été réalisés sur le Rochereau et 764 sondages et 19 fosses pédologiques sur la Moine, soit à des densités respectives de 1 sondage pour 21 ha et de 1 sondage pour 50 ha. Les sondages sont localisés pour représenter la variété des roches mères et sont orga-

Tableau 1 - Caractéristiques des deux bassins versants**Table 1** - Characteristic of the watersheds

	Rochereau	Moine
Surface du bassin versant	204 km ²	385 km ²
Départements	Maine-et-Loire, Deux-Sèvres et Loire-Atlantique	Vendée et Deux-Sèvres
Centre du bassin	1,05°W / 46,65°N	3,20°W / 47,03°N
Moyenne des précipitations	750 mm an ⁻¹	786 mm an ⁻¹
Altitudes extrêmes	44 à 280 m	41 à 201 m
Quartiles de profondeur du sol	25 % inférieurs à 0,35 m 75 % inférieurs à 0,75 m	25 % inférieurs à 0,45 m 75 % inférieurs à 1,10 m

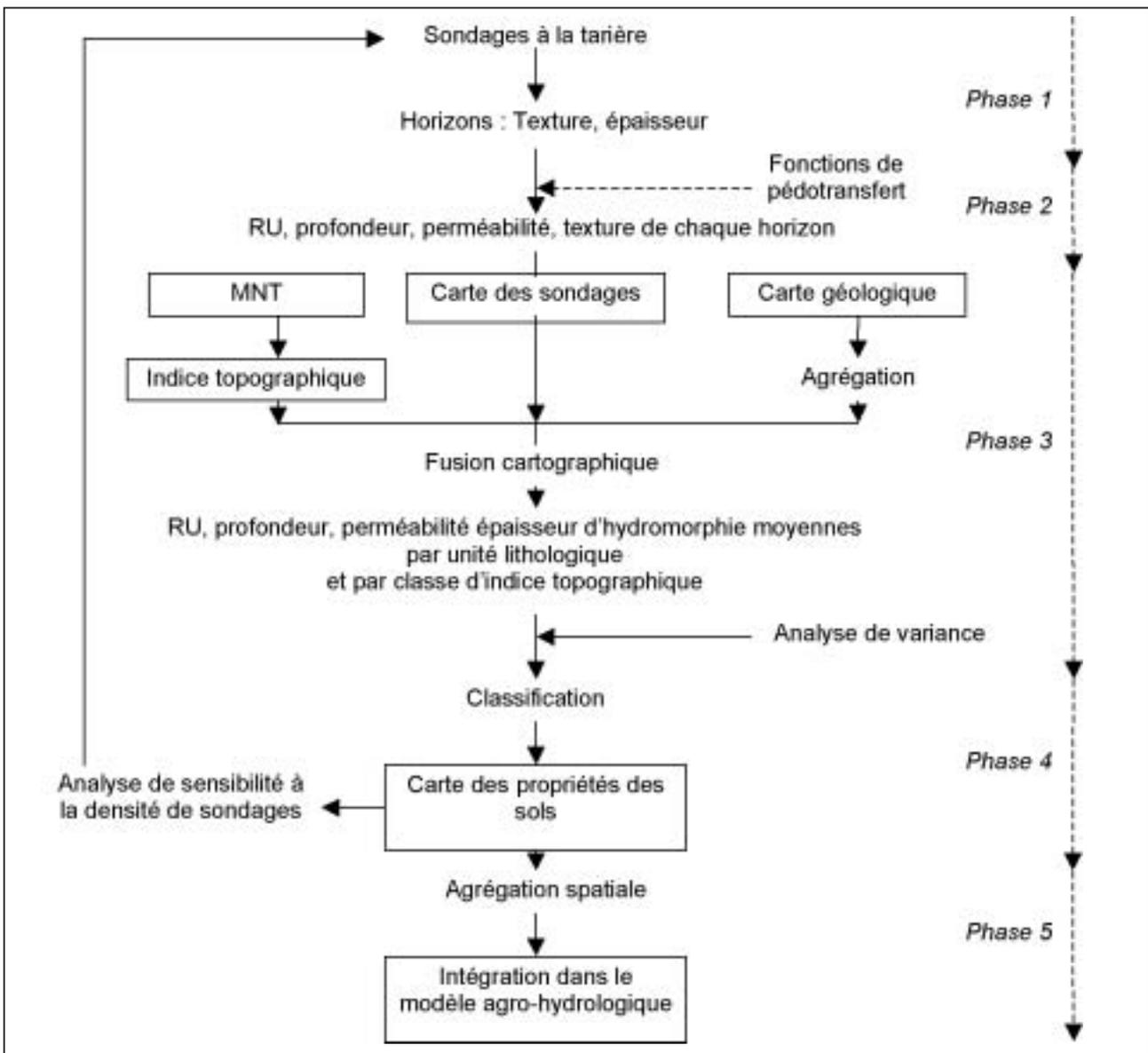
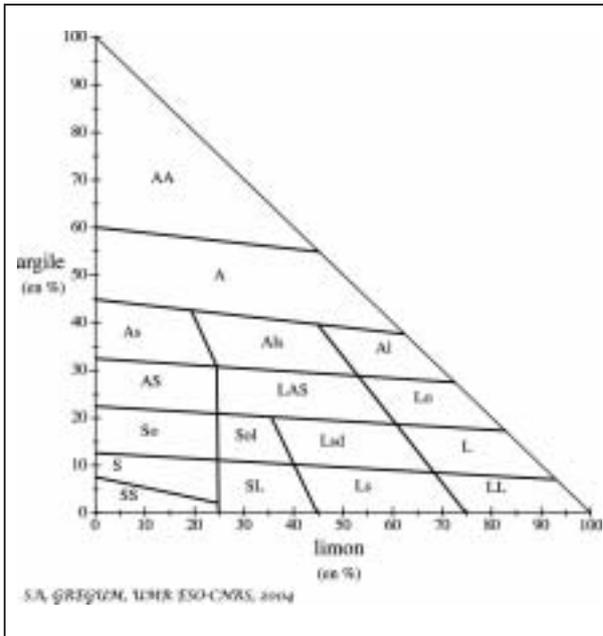
Figure 2 - Méthodologie (les couches cartographiques sont inscrites dans des boîtes)**Figure 2** - Methodology (the map layers are in box)

Figure 3- Triangle de texture du GEPPA
Figure 3 - GEPPA triangle of soil texture



nisés en toposéquences. Leurs coordonnées sont relevées par GPS.

Le sol est décrit sur une profondeur maximale de 1,20 m. Pour chaque sondage, les différents horizons sont identifiés de façon tactile et visuelle, leur texture est définie à partir du triangle du GEPPA (figure 3) (Baize, 2000).

Estimation de la Réserve Utile et de la perméabilité à l'aide de fonctions de pédotransfert

Il existe de multiples fonctions de pédotransfert pour quantifier la RU à partir de données texturales (Bastet *et al.*, 1998). Nous avons retenu les équations de régression linéaire de Rawls pour estimer la rétention en eau volumique à la capacité au champ (-330 hPa) et au point de flétrissement (-15000 hPa) (Rawls *et al.*, 1982; Rawls *et al.*, 1992). Cette fonction présente l'avantage d'une certaine simplicité des paramètres en adéquation avec le caractère qualitatif de l'estimation de la texture des horizons. Elle a été testée sur un large échantillon de sols américains (il concernait 2500 horizons prélevés dans 32 Etats des Etats-Unis) et a offert des coefficients de corrélation de 0,80 et de 0,87 pour l'estimation de la teneur en eau à :

- 15000 hPa et à -330 hPa respectivement.

$$W_{330} = 257,6 - (2 \times Sa) + (3,6 \times Ar) + (29,9 \times MO)$$

$$W_{15000} = 26 + (5 \times Ar) + (15,8 \times MO)$$

avec :

W_{330} teneur en eau à -330 hPa (en mm m⁻¹)

W_{15000} teneur en eau à -15000 hPa (en mm m⁻¹)

Ar : teneur en argile (en %)

Sa : teneur en sable (en %)

MO : teneur en matière organique (en %)

La réserve utile (RU) en mm est calculée pour chaque horizon par la fonction suivante :

$$RU = (W_{330} - W_{15000}) \times h$$

Avec h : épaisseur de l'horizon (en m)

Il est possible que ces fonctions de pédotransfert soient moins précises que d'autres qui s'appuient sur des classes granulométriques et sur d'autres paramètres du sol (Bastet *et al.*, 1998). Mais, ces autres fonctions requièrent des mesures en laboratoire réalisables qu'en un nombre limité de profils. Ainsi, ce que nous gagnerions en précision sur les fonctions serait perdu en représentativité des échantillonnages et diminuerait de ce fait la qualité de la spatialisation.

Chaque horizon est affecté à une classe de texture par détermination manuelle. La teneur en argile et en sable qui leur est affectée correspond alors au centroïde des classes de texture du triangle du GEPPA (figure 3). La teneur en matière organique est déterminée en 19 profils sur la Moine et en 20 profils sur le Rochereau. Elle varie essentiellement selon la nature de l'occupation du sol (prairie ou culture). Cependant, dans le cadre d'une problématique plus orientée vers des risques de pollution liés aux cultures, nous supposons que cette teneur est égale à la moyenne observée de chaque horizon sous culture annuelle, soit successivement à partir de la surface : 3 ; 1 ; 0,5 et 0,3 %. Ces valeurs sont affectées aux différents horizons des sondages pour le calcul de la RU. La pierrosité n'est pas prise en compte. Les fonctions de pédotransfert sont utilisées pour calculer la RU de chaque horizon de chaque sondage, puis les RU des horizons sont sommées pour obtenir la RU globale du sondage.

La perméabilité est calculée pour chaque horizon à partir du triangle de pédotransfert de l'USDA (Ministère de l'agriculture des Etats-Unis) (Rawls and Brakensiek, 1985) (figure 4). La perméabilité moyenne du sol est évaluée grâce à la moyenne des perméabilités des horizons pondérée par leur épaisseur.

Analyse spatiale et statistique

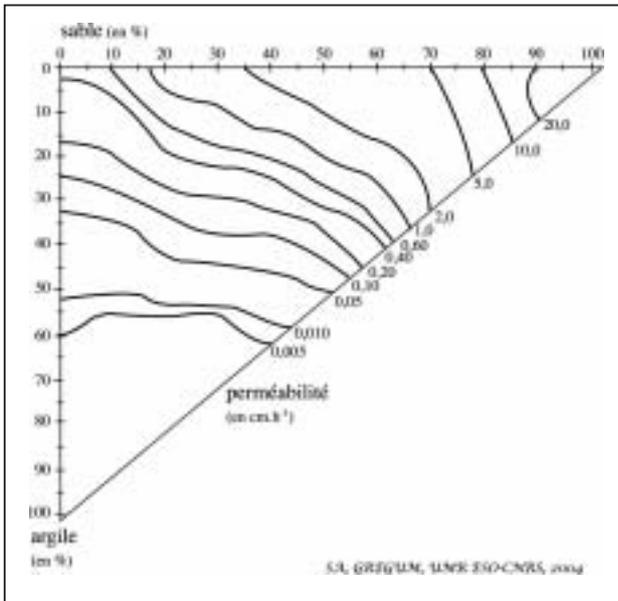
Les résultats précédents sont attachés aux points de sondages. Nous recherchons durant cette phase à déterminer les liens qui peuvent exister avec les variables lithologiques et topographiques afin de spatialiser les propriétés des sols. Nous considérons la lithologie et la topographie comme des variables explicatives, la texture (teneurs en argiles, en limons et en sables), la profondeur, la RU et la perméabilité comme des variables résultantes.

Les données qui sont mobilisées dans cette analyse sont :

- le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la BD Alti de l'IGN à une résolution de 50 mètres ; le MNT est traité à l'aide d'un SIG

Figure 4 - Le Rochereau, relations entre les classes d'indice topographique et les propriétés du sol

Figure 4 - Relations between topographic index and soil properties, Rochereau watershed



raster pour constituer la carte de pente et la carte d'indice topographique ;

- la carte géologique du BRGM au 1/50 000, numérisée pour former une couche cartographique du SIG, les unités lithologiques sont agrégées par familles de faciès ;

- la carte des sondages issue du terrain constitue une troisième couche cartographique.

Le MNT est utilisé pour calculer un indice topographique. L'indice utilisé a été défini par Beven et Kirkby, il est pertinent pour identifier le mouvement de l'eau à l'échelle du paysage (Beven and Kirkby, 1979). Il permet d'identifier la propension du sol à être saturé. Il a été largement validé sur des zones de socle où les nappes souterraines suivent la topographie.

L'indice topographique IT est défini ainsi :

$$IT = \left(\frac{\ln A}{\tan \beta} \right)$$

Avec :

A : surface amont drainée spécifique en m² par unité de largeur orthogonale à la direction d'écoulement,

β : pente topographique.

Plus la surface amont drainée spécifique est élevée et/ou plus la pente est faible (ce qui correspond à un indice topographique élevé), plus le sol aura tendance à être saturé.

L'intérêt de cet indice pour la prédiction de l'humidité des sols a fait l'objet de différents travaux. Merot *et al.* ont cherché à prédire l'extension des sols hydromorphes sur des bassins bretons à partir de cet indice (Merot *et al.*, 1995 ; Curmi *et al.*, 1997). Ils comparèrent les zones dépassant un certain seuil d'indice avec la carte des sols constituée au 1/25 000 : la structure spatiale et l'étendue des sols hydromorphes est correctement prédite par l'indice dans les fonds de talwegs. Mais l'hydromorphie de plateau est mal représentée par l'indice car elle est causée par la lithologie ou par des horizons pédologiques imperméables. Gascuel-Oudou *et al.*, (1998) ont modifié l'indice topographique en remplaçant la pente locale par la pente moyenne le long du chemin hydrologique séparant la maille de calcul du cours d'eau. Dans un travail récent, Merot *et al.* appliquèrent un indice topographique modifié intégrant la lame d'eau précipitée afin de prédire les zones humides dans différentes conditions climatiques en Europe (Merot *et al.*, 2003). La structure et l'extension générale sont bien identifiées mais l'indice ne permet pas de prédire la localisation exacte des zones humides. Nous allons voir par la suite que cet indice s'avère également pertinent pour d'autres propriétés physiques du sol : profondeur, texture, réserve utile et perméabilité.

La carte des points de sondages est ensuite croisée à la carte lithologique ainsi qu'à la carte de l'indice topographique afin de construire un tableau présentant les variables explicatives et les variables résultantes par sondage. L'analyse bivariée est présentée dans les figures 5 à 8.

Sur les deux bassins versants, les résultats mettent en évidence une croissance continue de la teneur en argile, de la profondeur du sol et de la RU lorsque l'indice topographique croît (figures 5 et 6). La perméabilité montre une décroissance significative mais irrégulière. La teneur en limons moyenne est constante entre les classes d'indice topographique sur le Rochereau et décroît en fonction de cet indice sur la Moine. Les moyennes des variables résultantes varient fortement entre unités lithologiques (figures 7 et 8). Ceci s'explique par la variabilité de vulnérabilité à l'altération des roches.

Les écarts types sont élevés pour la perméabilité en fonction des classes topographiques et lithologiques, ce qui révèle une forte variabilité spatiale au sein des unités.

Ces relations sont confirmées par une analyse de variance (tableaux 2 et 3). L'analyse de variance consiste à comparer les moyennes des classes d'échantillons (en l'occurrence, les classes d'indice topographique et les classes de lithologie). Le facteur F mesure le rapport de la moyenne des carrés des écarts entre les groupes par celle des carrés des écarts à l'intérieur des groupes. Lorsque F est supérieur à un seuil critique, on rejette l'hypothèse de moyennes égales entre les groupes, on admet alors qu'il y a un effet significatif de la variable de groupement sur la variable observée. Plus F est élevé par rapport au seuil critique, plus la variable de groupement est discriminante. La lecture des tableaux nous montre que les effets de l'indice topographique et de la lithologie sont significatifs et que l'indice topographique présente un potentiel de prédiction supérieur à la pente. La pertinence de la prise en compte de la litholo-

Figure 5 - La Moine, relations entre les classes d'indice topographique et les propriétés du sol
Figure 5 - Relations between topographic index and soil properties, Moine watershed

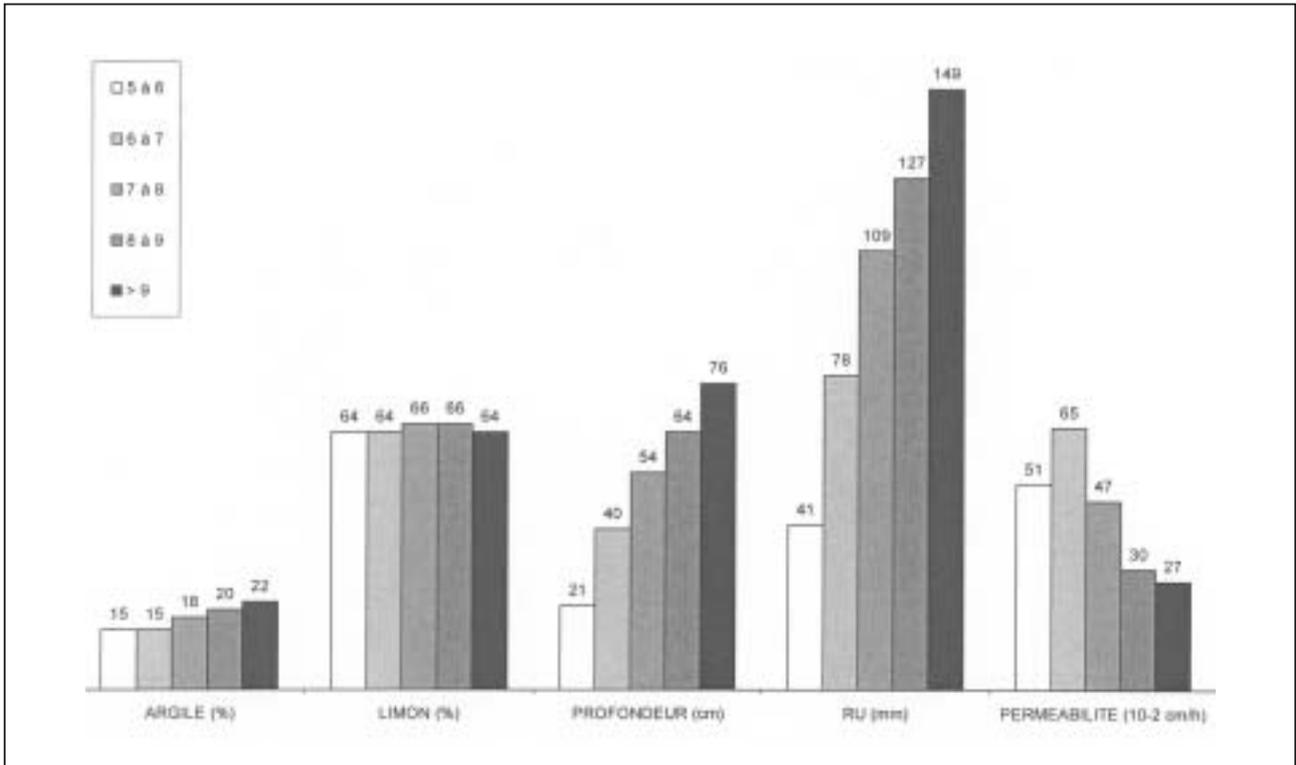


Figure 6 - Le Rochereau, Relation entre la lithologie et les propriétés du sol
Figure 6 - Relations between lithology and soil properties, Rochereau watershed

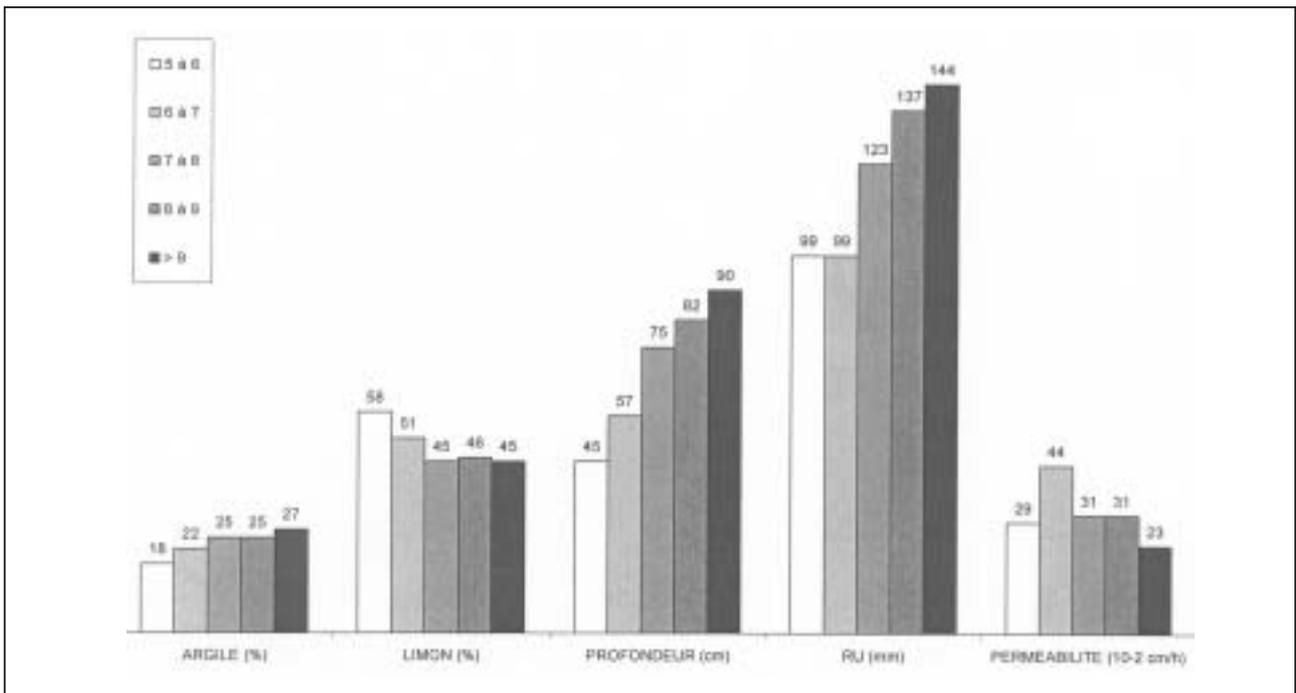


Figure 7 - Le Rochereau, Relation entre la lithologie et les propriétés du sol

Figure 7 - Relations between lithology and soil properties, Rochereau watershed

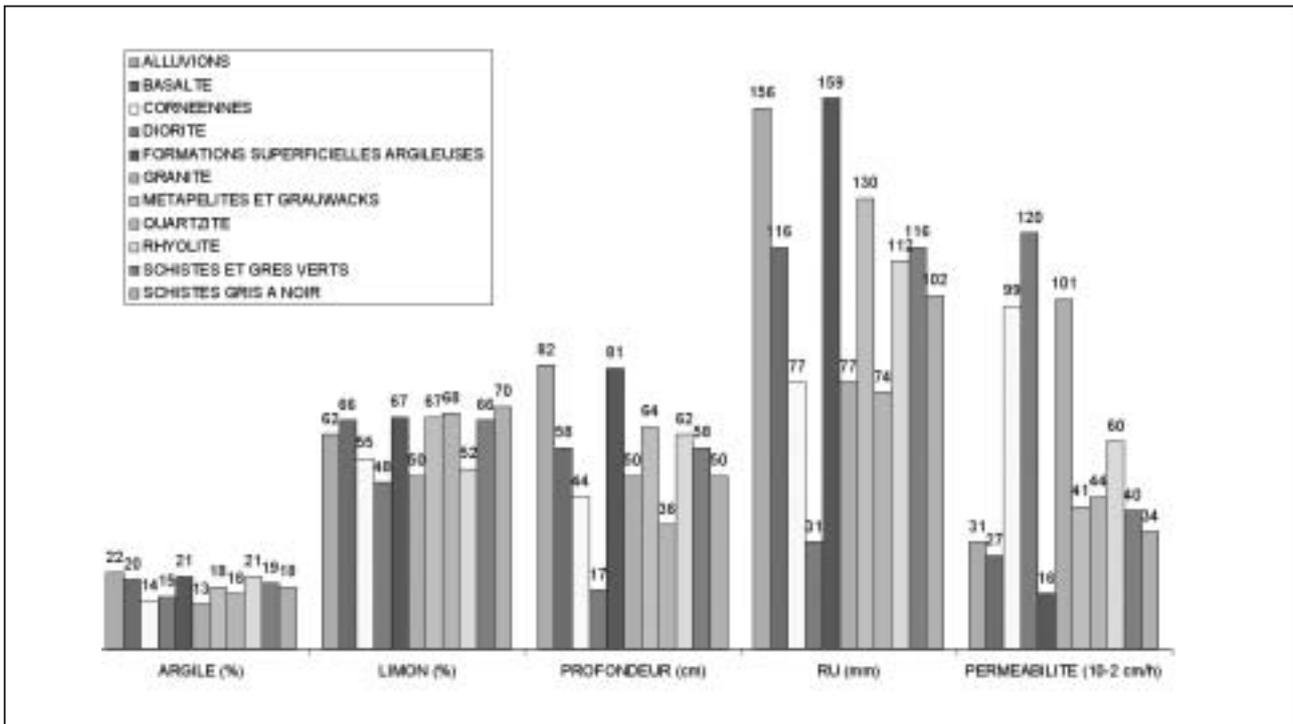


Figure 8 - La Moine, Relation entre la lithologie et les propriétés du sol

Figure 8 - Relations between lithology and soil properties, Moine watershed

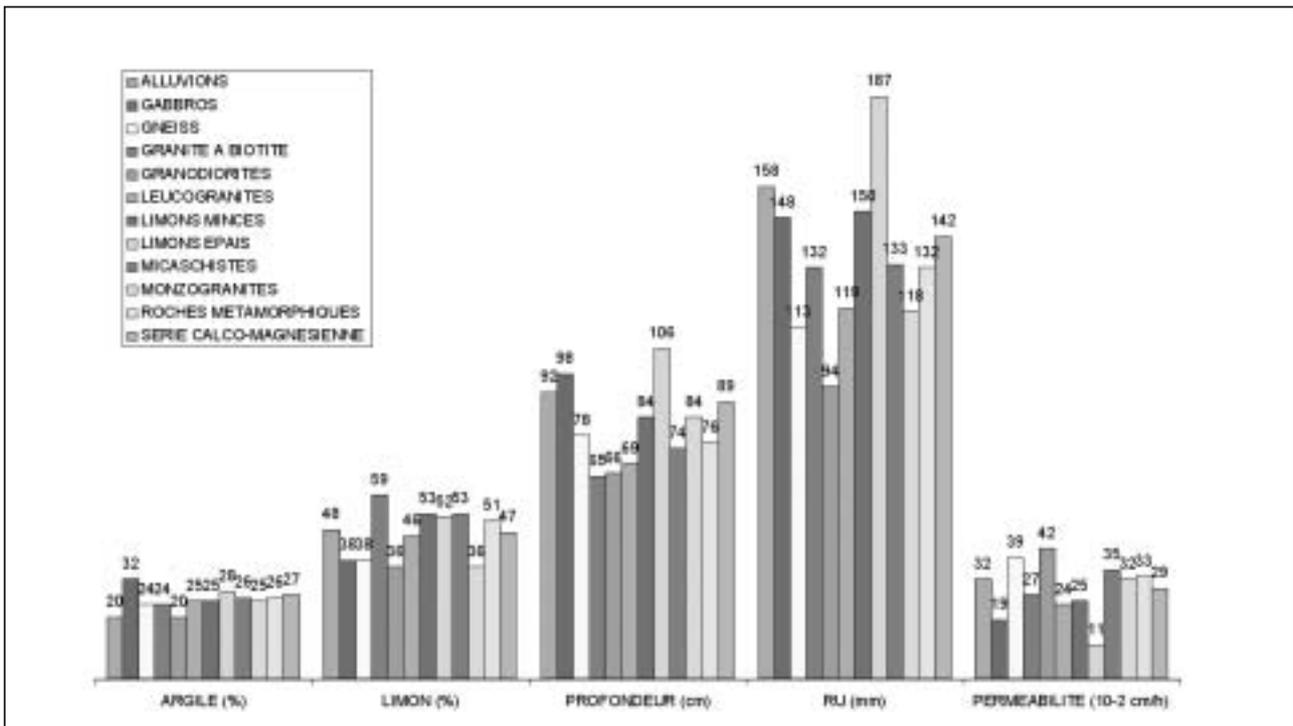


Tableau 2 - Le Rochereau, valeurs du facteur F de l'analyse de variance**Table 2** - F factor values of variance analysis, Rochereau watershed

	Lithologie	Pente	Indice Topographique	Combinaison lithologie – IT
Argile	9,92	7,48	18,4	4,48
RU	19,80	16,45	44,6	10,26
Profondeur	19,07	12,82	44,1	10,08
Perméabilité	14,03	8,61	11,9	4,87
seuil critique	1,84	2,38	2,38	1,42

Tableau 3 - La Moine, valeurs du facteur F de l'analyse de variance**Table 3** - F factor values of variance analysis, Moine watershed

	Lithologie	Pente	Indice Topographique	Combinaison lithologie – IT
Argile	4,48	5,14	5,37	2,26
RU	7,65	9,90	12,63	3,20
Profondeur	5,52	13,84	18,23	3,03
Perméabilité	2,05	3,73	3,65	1,67
seuil critique	1,76	2,11	2,38	1,37

gie a déjà été mise en évidence par King *et al.* (2003) qui ont montré que l'erreur moyenne d'estimation des propriétés par des fonctions de pédotransfert pouvait être réduite par la classification selon le type de matériau parental.

Cartographie des propriétés des sols sur le bassin versant

L'estimation de chaque combinaison de classe lithologique et topographique ne peut pas être obtenue directement par les observations parce que leur nombre est parfois trop réduit pour certaines combinaisons. Nous avons choisi de garder la richesse de la représentation des différentes classes de variables prédictives (une alternative aurait été de construire les classes afin de disposer d'un nombre suffisant d'observations dans chacune d'entre elles). Pour déduire les valeurs des différentes propriétés dans toutes les combinaisons, nous faisons les deux hypothèses suivantes :

- la valeur moyenne de la propriété du sol d'une unité lithologique peut être affectée à la classe d'indice topographique moyenne des sondages de cette unité lithologique ;
- l'écart entre les classes d'indice topographique d'une même unité lithologique est supposé égal à l'écart moyen entre les classes d'indice topographique de l'ensemble des sondages.

Ces hypothèses nous conduisent à affecter des valeurs de propriétés des sols à chaque combinaison d'indice topographique et de lithologie (l'évaluation de la profondeur du sol sur la Moine est illus-

trée dans le *tableau 4*). Les valeurs en caractère gras du tableau représentent les caractéristiques moyennes de la lithologie pour la classe d'indice topographique moyenne des sondages de chaque lithologie : selon la deuxième hypothèse, nous en déduisons les valeurs des autres classes d'indice topographique.

Les valeurs déduites par cette méthode sont liées à la carte des combinaisons d'indice topographique et de lithologie. La moyenne de la profondeur et la moyenne de la RU pour chaque combinaison sont utilisées pour renseigner la carte des unités spatiales de combinaison d'indice topographique – lithologie.

Les *cartes 2 et 3* illustrent l'évaluation de la profondeur du sol sur les deux bassins versants. Ces cartes ont une résolution de 50 m correspondant à celle de la BD Alti. Nous voyons apparaître de fortes différenciations spatiales entre les plateaux, les pentes des talwegs et leur fond. Mais, l'influence de la lithologie intervient aussi nettement au sein des plateaux où l'épaisseur des sols varie selon le matériau parental. En cohérence avec les tableaux précédents, les sols sont moins épais sur le bassin du Rochereau que sur celui de la Moine.

Analyse de sensibilité à la densité des sondages

La question est de savoir comment l'information dépend de la densité de points de sondages. Nous avons dégradé l'information initiale en ne retenant que certaines toposéquences, ce qui réduit le

nombre de points d'observation (cartes 4 et 5). Cette réduction entraîne une modification des relations identifiées entre les variables explicatives et les propriétés recherchées. Un calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur la surface relative de chaque classe de propriété permet d'estimer la sensibilité de ces classes à la densité de points de sondages (figure 9). Cinq classes ont été retenues pour chaque propriété, les limites des classes sont :

- profondeur : 20 / 40 / 60 / 80 cm ;
- teneur en argile : 22 / 24 / 27 / 30 % sur la Moine, 16 / 18 / 20 / 22 % sur le Rochereau ;
- RU : 50 / 100 / 150 / 200 mm ;
- perméabilité : 0,20 / 0,30 / 0,40 / 0,50 cm h⁻¹.

L'erreur quadratique moyenne s'accroît lorsque la densité de points baisse (sauf pour la RU du Rochereau). Mais la perte d'information n'est pas linéaire : elle s'accroît nettement lors du passage de 1 point pour 200 ha à 1 point pour 400 ha, particulièrement pour la profondeur et la RU (ces deux propriétés sont d'ailleurs étroitement liées).

La valeur du seuil dépend du contexte physiographique. L'identification de ce seuil permet, dans une région donnée, d'estimer la densité de sondages minimale pour déterminer avec une précision satisfaisante les relations entre la lithologie, la topographie et les propriétés des sols. Reste encore à savoir quel est l'impact de cette densité sur la modélisation ?

Introduction des données sur le sol dans le modèle agro-hydrologique

L'outil de modélisation retenu est le modèle SWAT développé par l'USDA (ministère de l'agriculture américain). Ce modèle a été conçu pour intégrer au moyen de lois physiques le rôle du milieu (le sol, le climat, la topographie, la nappe souterraine et les cours d'eau) et des activités agricoles par une représentation assez fine des itinéraires techniques et des propriétés des sols. Il a été validé sur de grands bassins dans différentes régions du monde (Arnold *et al.*, 1998 ; Srinivasan *et al.*, 1998 ; Arnold *et al.*, 2000 ; FitzHugh and Mackay, 2000 ; Santhi *et al.*, 2001 ; Muttiah and Wurbs, 2002 ; Jha *et al.*, 2003).

Sa mise en œuvre nécessite la constitution d'une base de données et la réalisation d'un calage et d'une validation du modèle sur une période et en des points où des mesures sont disponibles.

L'intérêt d'un tel modèle est triple :

- Mieux comprendre le fonctionnement du système et les relations entre pressions agricoles, milieu et qualité des eaux, en hiérarchisant le rôle des différents facteurs ;
- Cartographier les niveaux de pollution sur des secteurs non mesurés et les facteurs de risque et de vulnérabilité (indices tels que la lame écoulée, le lessivage, le ruissellement, le stockage des nutriments dans le sol et dans la nappe aquifère, etc.) ;
- Étudier l'impact de scénarios de changements de pratiques ou de choix culturels sur la qualité des eaux.

Le modèle SWAT requiert des données d'entrée spatialisées : les cultures ou successions culturales, la topographie, la météorologie et les sols. Il combine à ces données des paramètres comme les pratiques agricoles associées aux successions culturales pour estimer les flux dans la zone sous-racinaire, les nappes et les cours d'eau (Arnold *et al.*, 1998). Parmi les variables d'entrée du modèle, les données sur le sol sont souvent insuffisamment disponibles et de ce fait leur usage est critique (Bioteau *et al.*, 2002).

Sur la Moine, nous testons l'intérêt de la méthode de cartographie présentée auparavant en paramétrant les entités spatiales issues des combinaisons d'indice topographique et de lithologie, que nous appellerons dans la suite du texte « méthode sol – ITL ». Les paramètres du sol introduits sont : la profondeur, la perméabilité, la texture (ces paramètres résultent de la classification cartographique précédente) et la teneur en matière organique supposée égale à 1 %. Un seul horizon est saisi puisque la méthode d'analyse cartographique n'offre pas le moyen d'estimer l'organisation du sol en différents horizons.

L'occupation du sol est déduite du traitement d'images SPOT sur 2 années afin d'obtenir les successions culturales (qui sont plus pertinentes que de simples cultures annuelles pour évaluer les risques de lessivage de nitrate). Les pratiques agricoles ont été renseignées à partir d'une enquête auprès d'un échantillon de 80 agriculteurs. La climatologie est tirée des données de MétéoFrance (BD Climatèque). La BD Alti de l'IGN permet de prendre en compte l'effet de la topographie dans les processus d'écoulement.

La complexité spatiale présente dans la carte des propriétés des sols est inhérente à la prise en compte de l'indice topographique. Cette forte variabilité n'est pas intégrable directement dans le modèle pour des raisons de temps de calcul. En effet, le modèle SWAT est fondé sur des HRU (Hydrologic Responses Units), entités spatiales issues d'un croisement cartographique entre les sols, l'occupation des sols et les sous bassins versants. Plus les données d'entrée ont une résolution fine et une forte variabilité, plus les HRU sont nombreuses et plus les calculs sont lourds. Il est donc nécessaire de réaliser une agrégation spatiale des unités de sol pour réduire ces temps de calcul. Nous appliquons une grille carrée de 200 mètres de côté et affectons à chaque maille la HRU présente en son centre.

Résultats de la modélisation des flux de nitrate avec SWAT

Sur la Moine, les simulations sont réalisées sur six ans de 1996 à 2001 afin de confronter les résultats à des mesures de débit journalières et à des mesures chimiques mensuelles réalisées par la DIREN.

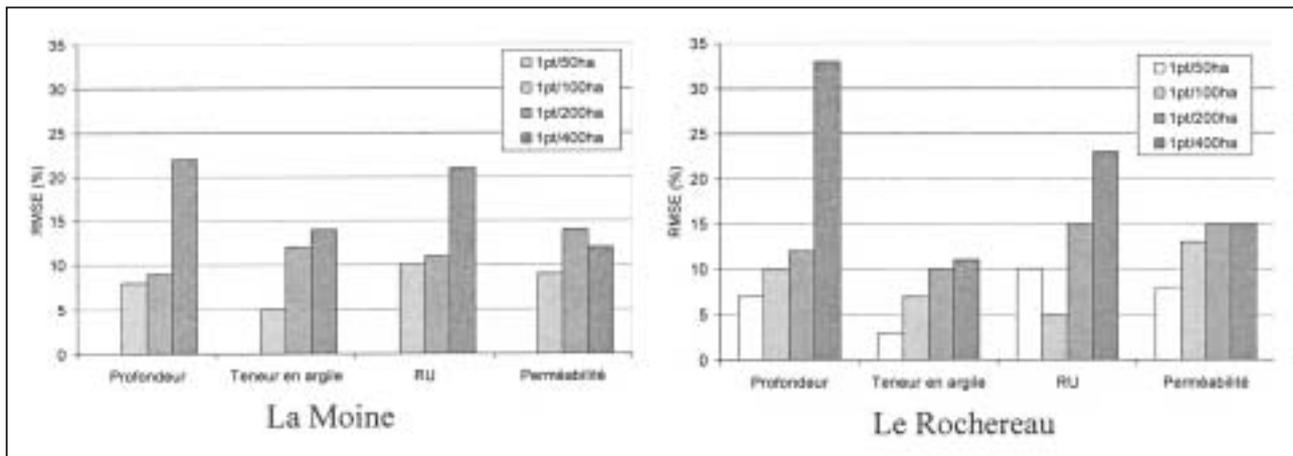
Le critère de validation des débits utilisé est l'indice de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) :

$$1 - \frac{\sum (Q_c - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_{mo})^2}$$

Tableau 4 - Estimation de la profondeur du sol (en cm) en fonction de la lithologie et des classes d'indice topographique sur la Moine**Table 4** - Soil depth estimation in function of lithology and topographic index, Moine watershed

	Nombre d'individ.	Classe d'indice Kirkby moy.	5 à 6	6 à 7	7 à 8	8 à 9	> 9
Moyenne de la profondeur			45	57	75	82	90
Ecart relatif entre classes d'indice de Kirkby				+12	+18	+7	+8
ALLUVIONS	16	8 à 9	55	67	85	92	100
GABBROS	46	8 à 9	61	73	91	98	106
GNEISS	130	8 à 9	41	53	71	78	86
GRANITE A BIOTITE	34	8 à 9	28	40	58	65	73
GRANODIORITES	37	7 à 8	36	48	66	73	81
LEUCOGRANITES	71	7 à 8	39	51	69	76	84
LIMONS MINCES	35	8 à 9	47	59	77	84	92
LIMONS EPAIS	41	8 à 9	69	81	99	106	114
MICASCHISTES	46	8 à 9	37	49	67	74	82
MONZOGRANITES	37	8 à 9	47	59	77	84	92
ROCHES METAMORPHIQUES	86	8 à 9	39	51	69	76	84
SERIE CALCO-MAGNESIENNE	25	8 à 9	52	64	82	89	97

Les valeurs en caractère gras représentent les caractéristiques moyennes de la lithologie pour la classe de Kirkby moyenne des sondages de chaque lithologie.

Figure 9 - Sensibilité de l'estimation des propriétés à la densité de points de sondage (RMSE : erreur quadratique moyenne)**Figure 9** - Sensitivity of soil properties to boreholes density (RMSE : Root Mean Square Error)

avec :

Q_c : débit journalier calculé ($m^3 s^{-1}$)

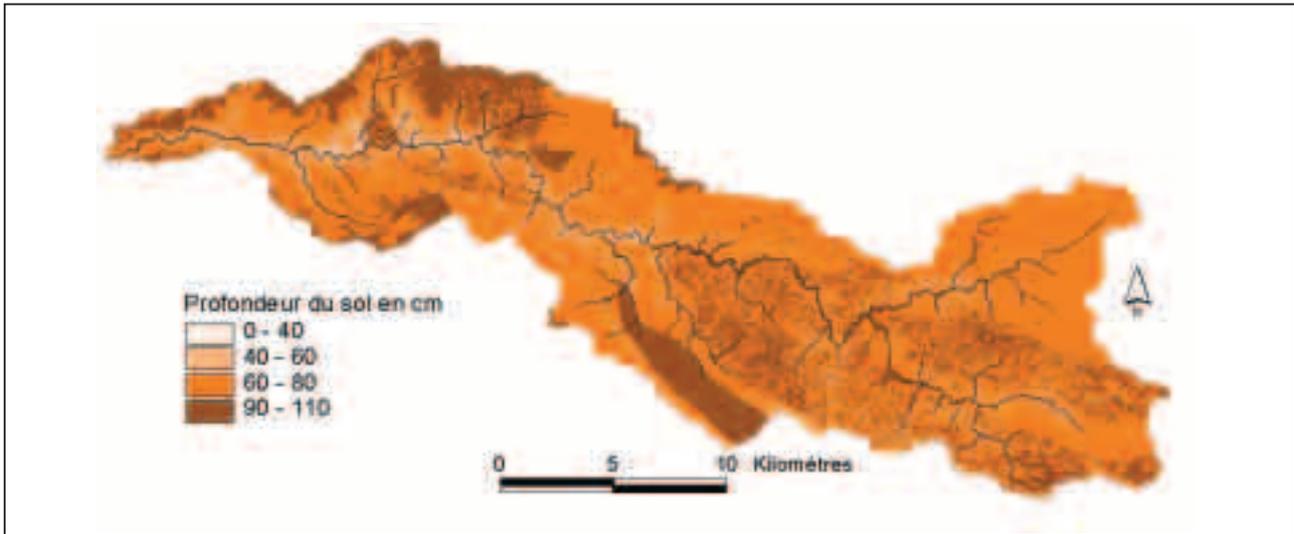
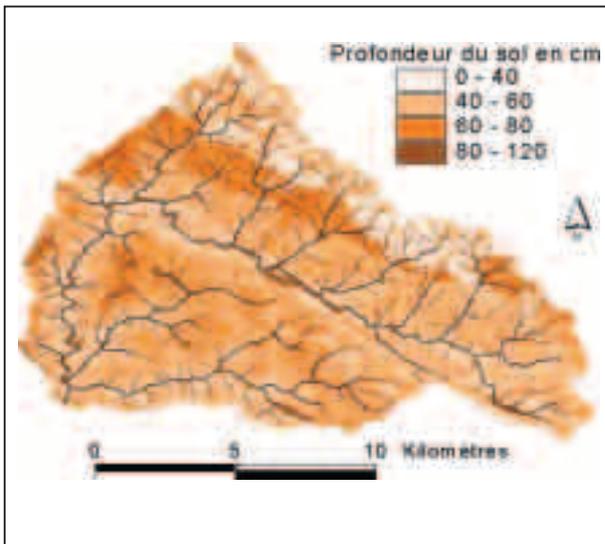
Q_o : débit journalier observé ($m^3 s^{-1}$)

Q_{mo} : débit journalier moyen ($m^3 s^{-1}$)

Ce critère permet d'estimer l'efficacité de la simulation : en comparant la variance résiduelle à la variance de la série observée. Il doit être cependant complété par une observation des courbes de

débit car il est plus sensible aux phases de crue qu'aux phases de tarissement.

Les simulations avec la méthode sol – ITL donnent des résultats satisfaisants après calage. La comparaison des débits des cours d'eau simulés et observés à un pas de temps journalier donne un indice de Nash de 0,71 pour les années de validation 2000-2001. La figure 10 montre l'adéquation entre les deux courbes : nous

Carte 2 - Profondeur du sol estimée sur la Moine**Map 2** - Soil depth estimation, Moine watershed**Carte 3** - Profondeur du sol estimée sur le Rochereau**Map 3** - Soil depth estimation, Rochereau watershed

pouvons relever une assez bonne représentation des crues hivernales et des étiages, les phases initiales de tarissement sont par contre trop brutales. Ceci s'explique par un manque de représentation de l'écoulement de subsurface, alors que le ruissellement et le drainage de la nappe sont mieux estimés.

Les risques de lessivage de l'azote sont fortement conditionnés par les prélèvements des cultures, il convient donc de valider les rendements simulés en les confrontant à des observations. Nous uti-

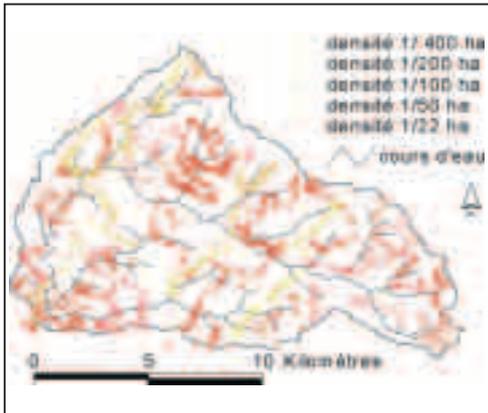
lisons les valeurs déclarées lors d'une enquête auprès d'un échantillon de 80 agriculteurs sur la Moine (Charpentier *et al.*, 2001). Comme le montre le *tableau 5*, pour un croisement de lithologie et d'indice topographique, les rendements sur les sols correspondant à un IT de 10 sont assez proches des déclarations (les moyennes des déclarations ne prennent pas en compte le type de sol). Pour les prairies, nous ne disposons pas d'observations mais les valeurs simulées donnent des grandeurs réalistes au vu des experts locaux. Pour des sols développés sur des entités avec un IT faible, les rendements sont nettement inférieurs (excepté pour le blé) essentiellement parce que ces sols ont une RU plus faible et que les cultures de printemps et les prairies connaissent ainsi un stress hydrique plus important.

Les mesures en nitrates dans la rivière ne sont pas assez fréquentes pour valider précisément les flux simulés, de plus, les flux dépendent des débits d'eau et sont donc peu sensibles à l'incertitude sur les concentrations en nitrates. Nous pouvons néanmoins remarquer que les tendances attendues sont assez bien représentées par le modèle avec la méthode sol - ITL. Le lessivage se produit de l'hiver au printemps à la suite de fertilisations, lorsque le sol est peu couvert et que l'écoulement hors du sol est important soit par ruissellement, soit par infiltration dans les nappes.

La moyenne annuelle de fuite de nitrate d'origine agricole hors du sol (cumul des différentes exportations : lessivage vers la nappe, par ruissellement et en subsurface) par HRU est évaluée globalement dans la *carte 6*. La forte variabilité spatiale résulte de la multiplicité des combinaisons de sols et de successions culturales. Ce sont les successions culturales qui font l'objet de fertilisations importantes et/ou qui laissent le sol nu en période d'excédent hydrique, sur les sols vulnérables à forte perméabilité et/ou à faible RU qui produisent les risques de lessivages les plus élevés.

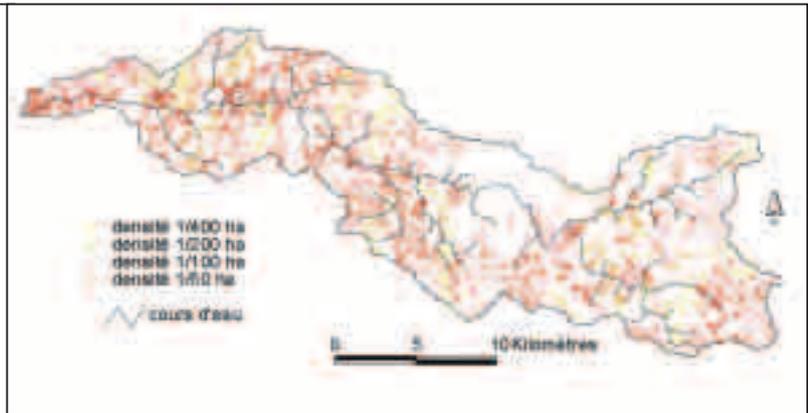
Carte 4 - Sondages sur le Rochereau

Map 4 - Boreholes, Rochereau watershed



Carte 5 - Sondages sur la Moine

Map 5 - Boreholes, Moine watershed



Les points de sondage de chaque densité sont représentés par la couleur de leur classe et par celle des classes de densité inférieure.

Figure 10 - Débits de la Moine à Roussay (station DIREN) et sensibilité des simulations à la méthode de cartographie et de description des sols, en 2000-2001

Figure 10 - Moine flow and simulation sensitivity to mapping and soil description method, 2000-2001

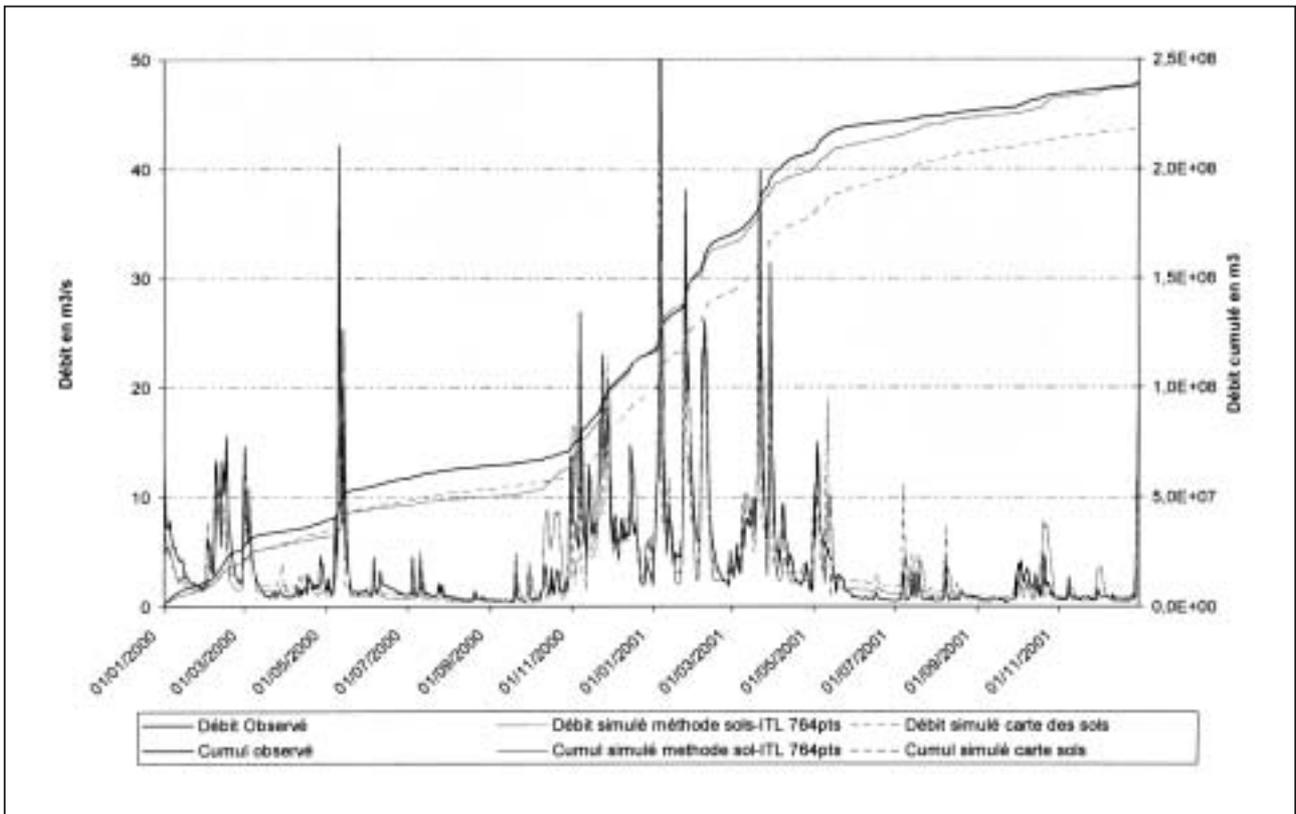


Figure 11 - Flux de nitrate (en kgN-NO₃/j) de la Moine à Roussay (station DIREN) et sensibilité de la simulation à la méthode de cartographie et de description des sols, en 2000-2001

Figure 11 - Nitrate flux (kgN-NO₃/day) in Moine river and simulation sensitivity to mapping and soil description method, 2000-2001

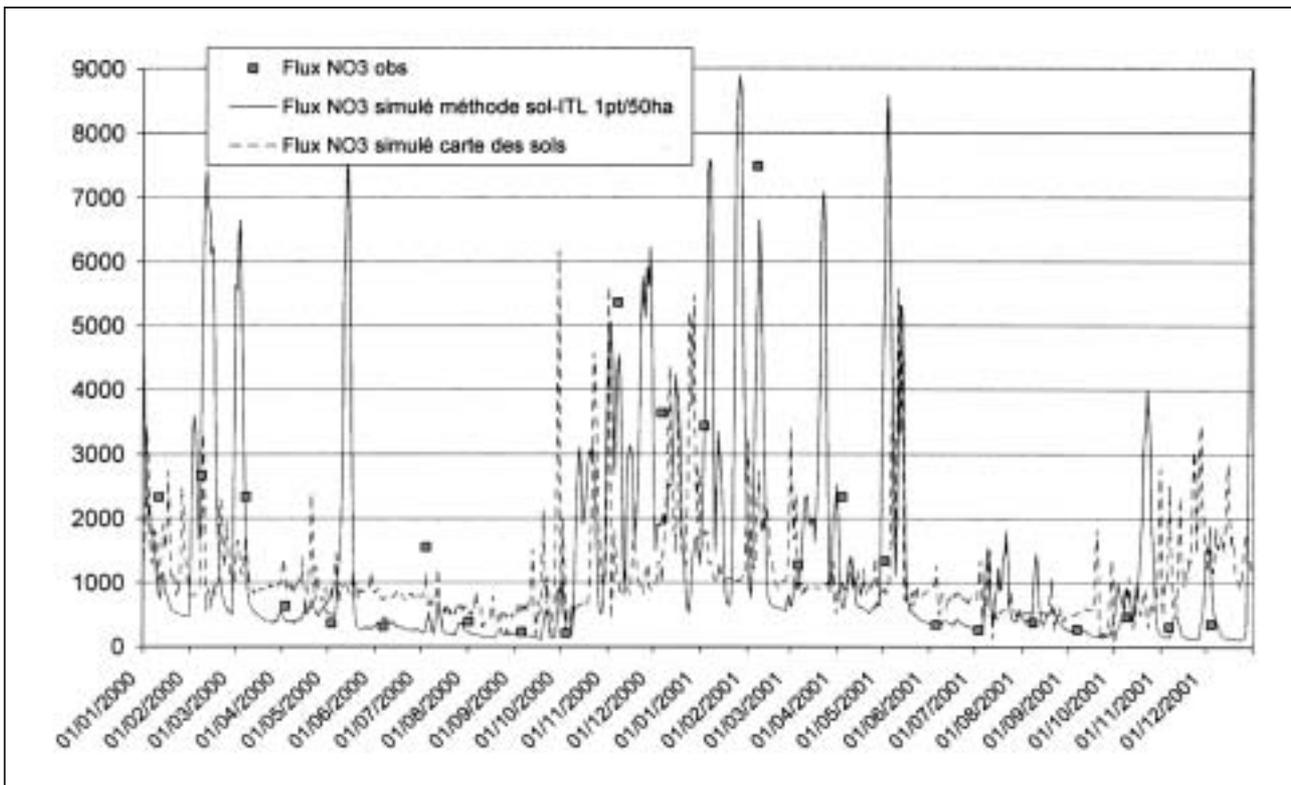


Tableau 5 - Rendements obtenus par enquête (Charpentier *et al.*, 2001) et rendements simulés avec SWAT sur des sols développés sur gabbros

Table 5 - Yields obtained from census data (Charpentier *et al.*, 2001) and simulated yields with SWAT on soils derived from gabbros

	Rendements moyens obtenus par enquête	Rendements moyens simulés, sols sur gabbros, IT = 7	Rendements moyens simulés, sols sur gabbros, IT = 10
Prairie permanente	-	7,0 tMS ha ⁻¹	7,3 tMS ha ⁻¹
Prairie temporaire	-	12,0 tMS ha ⁻¹	13,9 tMS ha ⁻¹
Blé	5,6 t ha ⁻¹	4,8 t ha ⁻¹	5,2 t ha ⁻¹
Maïs	13,1 tMS ha ⁻¹	9,8 tMS ha ⁻¹	12,2 tMS ha ⁻¹
Ray Grass Italien	-	8,1 tMS ha ⁻¹	13,9 tMS ha ⁻¹

La *carte 7* présente ces risques agrégés à l'échelle de sous bassins versants en réalisant la somme des exportations des HRU de chaque sous bassin. Les flux sont faibles comparativement aux valeurs observées dans l'ouest de la France. Ceci est cohérent avec les mesures de concentration dans la rivière. La variabilité spatiale n'est pas négligeable entre les sous bassins, elle s'explique par la proportion de HRU à risques de lessivage. Cette carte révèle des risques de pollution plus importants sur certains affluents ou sur cer-

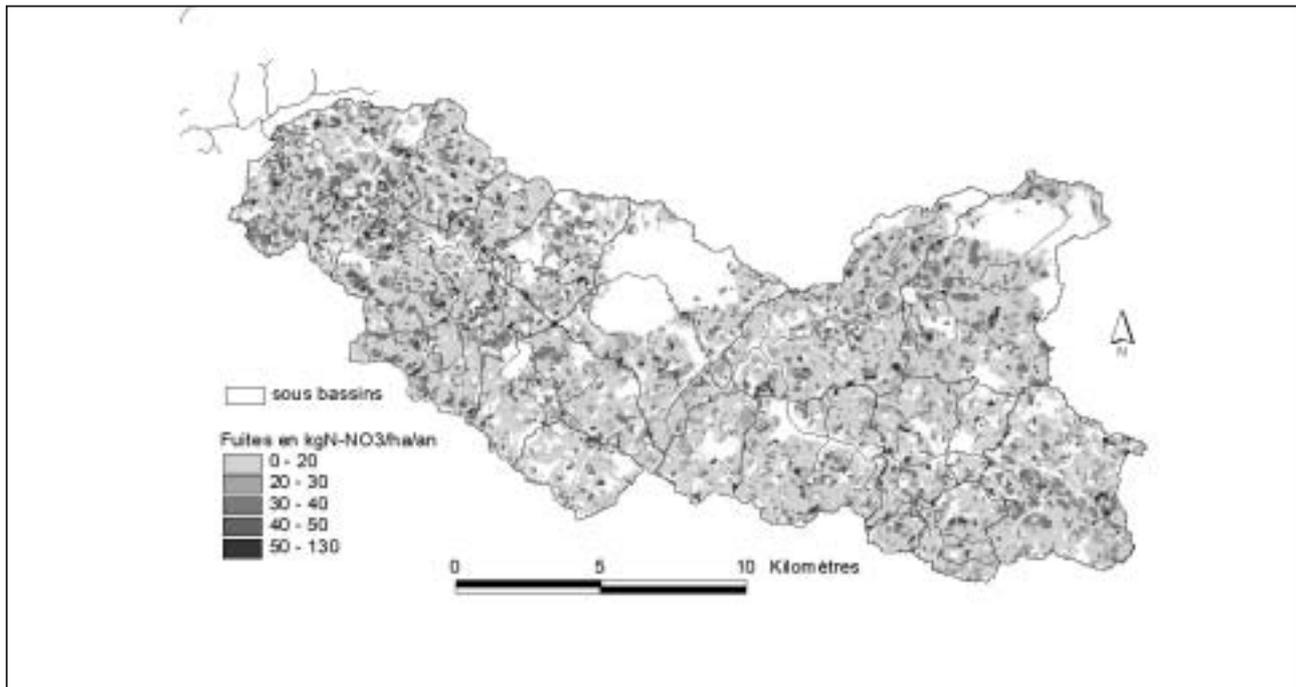
taines portions du cours d'eau, elle peut constituer un support à la prise de décision dans une logique de hiérarchisation spatiale des actions de protection.

Sensibilité du modèle à la cartographie des propriétés des sols

Afin d'évaluer l'adéquation de la méthode sol – ITL au modèle SWAT, nous comparons les résultats des simulations obtenus avec

Carte 6 - Risques de lessivage de nitrate hors du sol par HRU sur la Moine, en 2000-2001 (les zones non agricoles sont exclues)

Map 6 - Nitrate leaching risk out of soil by HRU, Moine watershed, 2000-2001 (excluding the non agricultural areas)



Carte 7 - Risques de lessivage de nitrate hors du sol par sous bassin sur la Moine, en 2000-2001 (les zones non agricoles sont exclues)

Map 7 - Nitrate leaching risk out of soil by subwatershed, Moine watershed, 2000-2001 (excluding the non agricultural areas)

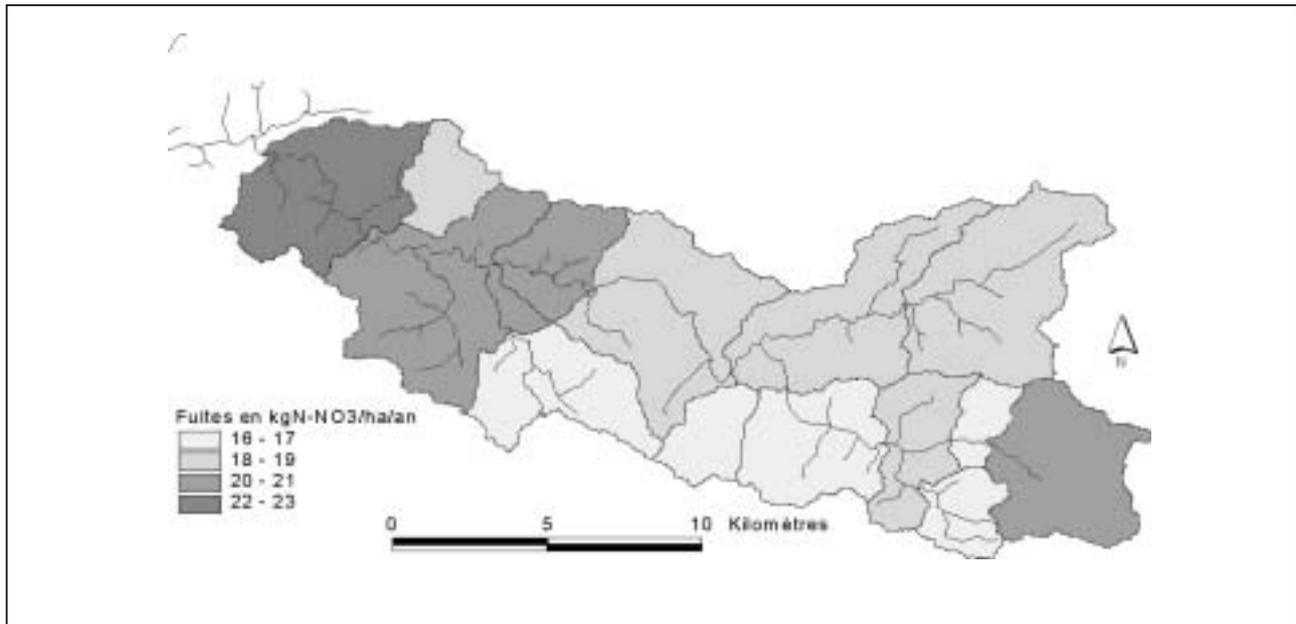


Tableau 6 - Sensibilité des simulations à la méthode de cartographie et de description des sols et à la densité de points de sondages sur la Moine, en 2000-2001**Table 6** - Simulation sensitivity to mapping and soil description method and to boreholes density, Moine watershed, 2000-2001

	Méthode carte des sols	Méthode sol – ITL 1point/50 ha	Méthode sol – ITL 1point/100 ha	Méthode sol – ITL 1point/200 ha	Méthode sol-ITL 1point/400 ha
Critère de Nash	0,82	0,71	0,70	0,71	0,70
Cumul écarts (m ³)	-20 824 249	- 1 141 137	2 369 641	9 703 048	4 429 210
R ² flux N-NO ₃	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56
Somme flux N-NO ₃ (kg an ⁻¹)	834 976	993 479	1 001 953	1 052 354	1 025 629
Pic journalier flux N-NO ₃ (kg j ⁻¹)	14 240	8 989	8 814	8 563	8 998

la carte et les valeurs des propriétés des sols issues de méthode sol – ITL à ceux issus de la carte des sols réalisée au 1/50 000. Dans ce dernier cas, la description des sols est plus riche puisque les différents horizons sont intégrés dans le modèle avec leurs propriétés alors qu'avec la méthode sol – ITL un seul horizon est utilisé pour caractériser le sol. Un calage différent est effectué avec chaque méthode.

Sur la période de validation 2000-2001, la méthode sol – ITL dégrade le critère de Nash de 0,82 à 0,71 (*tableau 6*). La variabilité des débits est plus forte avec la carte des sols. Cependant, l'observation des courbes de débits indique une moins bonne représentation des pics de crue mais une meilleure estimation des périodes d'étiages avec la méthode sol – ITL (*figure 10*). Par ailleurs, l'observation des cumuls d'écoulement sur 2000-2001 indique une meilleure efficacité de la méthode sol – ITL : le décrochement par rapport aux cumuls observés est beaucoup plus faible qu'avec la carte des sols (*tableau 6 et figure 10*), or la lame écoulée a un impact important sur les transferts de nitrates.

En ce qui concerne les flux de nitrates, les quantités comme la dynamique de transfert différent entre les deux méthodes (*figure 11*). Sur l'ensemble de la période, les flux sont plus élevés avec la méthode sol – ITL. En observant les courbes, nous pouvons noter que de nombreux pics de flux apparaissent seulement avec la méthode sol – ITL, alors que les flux en période d'étiage sont nettement inférieurs avec cette méthode qu'avec la carte pédologique. Le calcul du coefficient de corrélation R² donne une valeur similaire de 0,56 aux deux méthodes, mais il est très sensible au moindre décalage journalier, l'analyse graphique paraît alors plus pertinente. Nous pouvons remarquer sur la *figure 11* que la méthode sols – ITL tend à mieux reproduire les transferts observés.

Sensibilité du modèle à la densité de points utilisés dans la méthode sols – ITL

Les relevés de terrain représentent des coûts et des temps d'observation non négligeables. La question est de savoir quelle est

la sensibilité du modèle SWAT à la densité de points de sondages dans la méthode sols – ITL ? Comme nous l'avons vu précédemment, le nombre de sondages modifie l'évaluation des propriétés des sols, en quoi les variations de ces propriétés altèrent-elles les résultats des simulations ? Quel est le niveau de densité de points de sondage permettant de représenter correctement les émissions et les transferts de nitrate ?

En terme de simulation des débits, le critère de Nash n'est pas modifié par le changement de densité de sondages : il reste entre 0,70 et 0,71 (*tableau 6*). Les cumuls d'écoulement sur les deux années de validation montrent cependant un écart plus fort en dessous de 1 point de sondage pour 100 ha. L'estimation des transferts de nitrate reste similaire quelque soit la densité de points : le coefficient de corrélation R² est de 0,56, le cumul des flux sur deux ans est voisin de 1 million de tonne de N-NO₃ (*tableau 6*). Nous n'avons représenté ni les courbes de débit, ni celles de flux de nitrate, réalisées à partir des différentes densités de point, car les courbes sont trop proches les unes des autres. D'après ces résultats, le modèle est donc assez peu sensible aux variations des propriétés des sols en fonction de la densité de sondages.

Conclusion

L'intégration des données pédologiques constitue une clef importante dans l'évaluation des risques de pollution diffuse d'origine agricole. L'enjeu est de mieux comprendre les phénomènes de transfert à l'échelle de bassins versants et de mieux cerner les espaces à risques. Le rapport coût – efficacité des actions entreprises pourrait en effet être amélioré en concentrant les efforts sur les espaces les plus fortement responsables. Dans cet article, nous avons présenté une méthode qui permet de cartographier les propriétés des sols utilisées dans un modèle agro-hydrologique. L'intérêt de l'indice topographique a été mis en évidence pour l'identification de différentes variables (pas seulement de l'hydromorphie qui a fait l'objet de différentes publications). Le travail de pédologie de terrain reste

bien entendu indispensable pour caler les classes réalisées par croisement cartographique.

La méthode proposée permet d'alimenter en données le modèle SWAT. Ce modèle offre des résultats d'une qualité raisonnable en ce qui concerne les débits des cours d'eau et les flux de nitrates. L'emploi d'une carte des sols ne paraît pas apporter plus de qualité aux sorties du modèle, la simulation des flux de nitrate semble même plus efficace avec la méthode sol – ITL. L'analyse de sensibilité montre par ailleurs que sur le bassin étudié et avec le modèle SWAT, il est possible de réduire la densité de points de sondages pour caler la méthode sol – ITL.

La cartographie des propriétés des sols et son introduction dans un modèle tel que SWAT pourrait en tous cas permettre de rationaliser les choix d'actions à l'échelle de bassins versants en appuyant la prise de décisions sur une connaissance plus objective de la variabilité des risques. A partir de ces éléments, il serait notamment possible d'étudier l'effet de scénarios de changement de pratiques agricoles selon les propriétés des sols.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du programme national INRA DADP. Ils ont été financés par le Contrat de Plan Etat – Région Pays de la Loire « ARPENT – DADP Pays de la Loire » et par le fond structurel européen FEOGA dans le cadre du programme IGCS Pays-de-la-Loire, pour ce qui est de la cartographie sur la Moine.

BIBLIOGRAPHIE

Arnold J. G., Muttiah R. S., Srinivasan R. and Allen P. M., 2000 - Regional Estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology* (227) : pp. 20-41.

Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah R. S. and Williams J. R., 1998 - Large area hydrologic modeling and assessment, Part 1 : Model Development. *JAWRA* 34 (1) : pp. 73-90.

Baize D., 2000 - Guide des analyses en pédologie. Paris, 2^e édition revue et augmentée.

Baize D. and Girard M. C., 1995 - Référentiel pédologique. Paris.

Bastet G., Bruand A., Quetin P. and Cousin I., 1998 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols* 5 (1) : pp. 1-24.

Berthelot S., 2002 - Délimitation des zones à risques de pollutions azotées sur le bassin versant du Rochereau (Vendée) à partir d'un logiciel de modélisation (SWAT). Cemagref, Mémoire de DESS de l'Université du Maine, Le Mans : 64 p.

Beven K. J. and Kirkby M. J., 1979 - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24 : pp. 43-69.

Bioteau T., Bordenave P., Laurent F. and Ruelland D., 2002 - Evaluation des risques de pollution agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation hydrologique avec SWAT. *Ingénieries - EAT* 32 : pp. 3-13.

Bui E. and Moran C., 2003 - A strategy to fill gaps in soil survey over large spatial extents : an example from the Murray-Darling basin of Australia. *Geoderma* 111 : pp. 21-44.

CALLIGEE, 1998 - Etude préalable à l'instauration des périmètres de protection, prise d'eau de Ribou, Maine et Loire, vol. B, partie 1. Nantes, Ville de Cholet : 35 p.

Carre F., 2002 - Cartogénèse des sols et changement d'échelle, application dans la région de La Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations. Paris, INRA Paris-Grignon : 392 p.

Charpentier L., Duchet J., Guiho M., Hergoualch C., Le Garrec L., Rougerie P. and Rousseau M. L., 2001 - Spatialisation des pratiques agricoles sur le bassin versant de la Moine. Angers, ESA : 26 p.

Curmi P., Bidois J., Bourrié G., Cheverry G., Durand P., Gascuel-Oudou C., Germon J. C., Hallaire V., Hénault C., Jaffrezic A., Mérot P., Trolard F., Walter C. and Zida M., 1997 - Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. *Etude et Gestion des Sols* 4 (2) : pp. 95-114.

Curmi P., Walter C., Gascuel-Oudou C. and Durand P., 1996 - Interest of class pedo-transfer functions and soil distribution models for water quality studies : the case of nitrate in armorican catchments. The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe, Orléans (France), 10-12 oct. 1996.

Euriat A. and Tritz F., 2002 - Cartographie des sols et de leur vulnérabilité aux pollutions agricoles, bassin versant de la Moine. Mémoire de maîtrise de Sciences de la Terre et de l'Univers, encadré par J.-P. Rossignol et F. Laurent. Nancy, Université Poincaré : 63 p.

FitzHugh T. W. and Mackay D. S., 2000 - Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology* (236) : pp. 35-53.

Gascuel-Oudou C., Merot P., Crave A., Gineste P., Taha A. and Zhang Z., 1998 - Les zones contributives de fond de vallée : localisation, structure et fonctionnement hydrodynamique. Agriculture intensive et qualité des eaux. C. Cheverry, INRA, coll. Science Update : pp. 129-142.

Jha M., Gassman P., Secchi S., Gu R. and Arnold J. G., 2003 - Hydrologic simulations of the Manquoketa river watershed with SWAT. AWRA 2003, Spring Speciality Conference, Agricultural Hydrology and Water Quality, Kansas City, MO, CD Rom.

King D., Bruand A., Cousin I. and Hollis J., 2003 - Rôle des propriétés physiques des sols et de leur variabilité spatiale sur les flux d'eau. *Etude et Gestion des Sols* 10 (4) : pp. 287-297.

Lagacherie P., Legros J. P. and Burrough P. A., 1995 - A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma* (65) : pp. 283-301.

Lagacherie P. and Voltz M., 2000 - Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data : a conditional probability approach. *Geoderma* (97) : pp. 187-208.

Laurent F., Delclaux F. and Graillet D., 1998 - Perte d'information lors de l'agrégation spatiale en hydrologie. Application à un modèle hydrologique. *Revue Internationale de Géomatique* 8 (1-2) : pp. 99-119.

Laurent F. and Rossignol J. P., 2003 - Cartographie des propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes. Application au bassin versant de la Moine (France, Maine-et-Loire). *Etude et Gestion des Sols* 10 (3) : pp. 155-170.

Levrel G., 2003 - Acquisition de données de cartographie pédologique du bassin versant du Rochereau, Vendée. Mémoire de maîtrise de Sciences de la Terre et de l'Univers, encadré par J.-P. Rossignol et F. Laurent. Nancy, Université Poincaré : 107 p.

Martin-Clouaire R., Cazmier D. R. and Lagacherie P., 2000 - Representing and processing uncertain soil information for mapping soil hydrological properties. *Computers and Electronics in Agriculture* (29) : pp. 41-57.

Mc Bratney A. B., Mendonça Santos M. L. and Minasny B., 2003 - On digital soil mapping. *Geoderma* (117) : pp. 3-52.

Mc Kenzie N. and Ryan P. J., 1999 - Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* (89) : pp. 67-94.

- Merot P., Ezzahar B., Walter C. and Arousseau P., 1995 - Mapping waterlogging of soils using Digital Terrain Models. *Hydrological Processes* 9: pp. 27-34.
- Merot P., Squiviant H., Arousseau P., Burt T., Maitre V., Kruk M., Butturini A., Thenail C. and Viaud V., 2003 - Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecol. Model.* 163 : pp. 51-71.
- Muttiah, R. and Wurbs R., 2002 - Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology* (256) : pp. 264-285.
- Nash J.E. and Sutcliffe J.V., 1970 - River flow forecasting through conceptual models, 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* (10) : pp. 282-290.
- Rawls W., Ahuja L., Brakensiek D. and Shirmohammadi A., 1992 - Infiltration and soil water movement. *Handbook of hydrology*. D. Maidment. New York, McGraw-Hill, Inc.
- Rawls, W. and Brakensiek D., 1985 - Prediction of Soil Water Properties for Hydrologic Modeling. *Watershed Management in the Eighties*, ASCE : pp. 293-299.
- Rawls W., Brakensiek D. and Saxton K. E., 1982 - Estimating Soil Water Retention from Soil Properties. *J. Irrig. Drain. Eng.* 108 (IR2) : pp. 166-171.
- Santhi C., Arnold J. G., Williams J. R., Dugas W. A., Srinivasan R. and Hauck L. M., 2001 - Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA* 37 (5) : pp. 1169-1189.
- SIAEP, 1999 - Diagnostic du bassin versant de Rochereau. La Roche sur Yon, Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable des sources de l'Arkanson - SDAEP : 106 p.
- Srinivasan R., Ramanarayanan T. S., Arnold J. G. and Bednarz S. T., 1998 - Large area hydrologic modeling and assessment, Part 2 : Model Application. *JAWRA* 34 (1) : pp. 91-101.
- Walter C., 2002 - Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Rennes, France, ENSAR : 96 p.
- Zhu A. X. and Scott Mackay D., 2001 - Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *Journal of Hydrology* (248) : pp. 54-77.

