

Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (R.U.) dans le périmètre de l'O.G.A.F.

Environnement de la zone de Migennes (Yonne)

G. Trouche ⁽¹⁾ et P. Morlon ⁽²⁾

(1) ENESAD, Sciences et Techniques Agronomiques - INRA, Systèmes Agraires et Développement

(2) INRA, Systèmes Agraires et Développement, 26 Bd Dr Petitjean, BP 1607, 21036 Dijon cedex

RÉSUMÉ

La pollution diffuse des nappes phréatiques par les nitrates d'origine agricole dépend des propriétés hydriques des sols. Les sols à faible réserve en eau cumulent une fréquente surfertilisation par les agriculteurs à cause de l'irrégularité des rendements et une lixiviation hivernale plus précoce et complète. Dans l'étude pour l'OGAF-environnement (Opération Groupée d'Aménagement Foncier) dans la région de Migennes (Yonne), nous avons cartographié la réserve en eau utile des sols (RU) dans un S.I.G. Mais, ne disposant pas directement des valeurs de RU dans les deux études pédologiques déjà existantes sur la zone, nous avons utilisé pour l'estimer des Fonctions de pédotransfert (FPT) basées sur des équations de régression (Gras, Osty) ou sur les classes texturales (Station de l'Aisne, Station de Rothamsted). Par comparaison avec les fourchettes indiquées dans l'une des études pédologiques, les valeurs de R.U. obtenues sont globalement surestimées, surtout avec la première méthode citée. Des valeurs issues de mesures, pour un échantillon de sols, montrent que le remaniement des échantillons conduit également à la surestimation de la R.U. Par contre l'estimation de la densité apparente, utilisée pour passer de l'humidité massique à l'humidité volumique, intervient peu dans cette estimation, lorsque l'on considère la R.U. de l'ensemble du profil.

Mots clés

Fonctions de pédotransfert, système d'information géographique, réserve en eau utile, capacité de rétention, texture, densité apparente, Yonne, Bourgogne, France.

SUMMARY

COMPARISON OF VARIOUS METHODS TO ESTIMATE THE AVAILABLE WATER STORAGE IN THE SOILS (AWS) RELATED WITH AN AGRI- ENVIRONMENTAL OPERATION IN THE AREA OF MIGENNES (YONNE, FRANCE)

Pollution of groundwater by nitrate leaching is related with the soil-water relationships. A work of the INRA-SAD laboratory of Dijon in the area of Migennes (Yonne, France) showed that the highest risk of pollution from agriculture is located on fields with shallow soil and high permeability, where an excess of fertilizers results from the difference between real and target yield, and where the drainage of excess water in winter or from irrigation occurs sooner and more completely. We mapped the available water storage (AWS) of soils in this area in a GIS using the information given by two previous pedological studies. Because the AWS values are not available in these studies, we estimated it using pedotransfer functions (PTF) based on equations of regression (Gras, Osty) or on texture classes (Aisne

and Rothamsted stations). Compared with the range of values (minimum and maximum) indicated in one of the pedological studies, these equations, especially the first method quoted, overestimated the AWS. Values resulting from measurements, for a small sample of soils, shows that the rehandling of the samples also leads to over-estimate the AWS. On the other hand, the bulk density, used to convert the mass moisture into a volumetric value, intervenes little in the AWS estimation for the whole profile.

Key-words

Pedotransfer function, Geographical Information System, available water storage, retention capacity, texture, bulk density, Yonne, Burgundy, France.

RESUMEN

COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA RESERVA ÚTIL EN AGUA (R.U.) DE LOS SUELOS DEL PERÍMETRO DE O.G.A.F.- MEDIO AMBIENTE DE LA ZONA DE MIGENNES (YONNE, FRANCIA) POR LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (S.I.G.)

La contaminación difusa de los mantos freáticos por nitratos de origen agrícola depende de las propiedades hídricas de los suelos. Los suelos con una reducida reserva en agua acumulan frecuentemente una sobre-fertilización por parte de los agricultores a causa de la irregularidad de los rendimientos y una lixiviación durante el invierno más precoz y completa. En el estudio para el OGAF-medio ambiente (Operación de grupos para el manejo de la tenencia de la tierra) en la región de Migennes (Yonne), se cartografió la reserva en agua útil de los suelos (RU) en un SIG. Pero, Debido a que no existían los valores de RU de dos estudios pedológicos previos de la zona, se usó para estimarlos las funciones de pedotransferencia (FPT) basadas sobre las ecuaciones de regresión (Gras, Osty) o sobre las clases texturales (estación de l'Aisne, estación de Rothamsted). Para comparar con los rangos indicados en uno de los estudios pedológicos, los valores de R.U. obtenidos son generalmente sobrestimados, principalmente con el primer método citado. Valores que provienen de medidas, de una muestra de suelos, indican que la toma de muestras conduce igualmente a la sobrestimación de la R.U.. Contrariamente la densidad aparente, utilizada para determinar la humedad volúmica a partir de la humedad ponderal, interviene poco en esta estimación, cuando se considera la R.U. de todo el perfil.

Palabras claves

Funciones de pedotransferencia, sistema de información geográfico, reserva en agua aprovechable, capacidad de retención, textura, densidad aparente, Yonne, Bourgogne, Francia.

Une O.G.A.F.- environnement (Opération Groupée d'Aménagement Foncier) expérimentant des changements de pratiques agricoles pour réduire la pollution diffuse des eaux de captage par les nitrates d'origine agricole a été mise en place en 1991 dans la région de Migennes (Yonne). L'enquête sur les pratiques des agriculteurs de la zone, réalisée par le laboratoire INRA-SAD de Dijon, en appui à cette opération (Morlon et al., 1996; Morlon et al., 1998), fait ressortir un risque polluant élevé sur des parcelles à sols peu profonds sur substrat filtrant (formations alluviales). Deux caractéristiques du sol expliquent ce risque important :

- réserve en eau insuffisante face à la demande climatique, entraînant fréquemment des rendements inférieurs à l'objectif de récolte sur lequel l'agriculteur a basé la quantité de fertilisant apportée, générant donc des excédents de fertilisation;
- profondeur faible et bon drainage interne, donc entraînant rapidement des nitrates au-delà des couches exploitées par les racines des couverts végétaux.

Le recours à l'irrigation pour lever cette contrainte face aux aléas climatiques constitue une solution délicate à gérer, dans la mesure où ces sols présentent une profondeur irrégulière au sein d'une même parcelle : au cours de nos propres campagnes d'observation nous avons pu noter des profondeurs variant par exemple de 30 à 100 cm à moins de 100 m de distance. Localement les doses d'arrosage peuvent être supérieures à la capacité de stockage en eau du sol, provoquant des écoulements d'eau gravitaire vers la profondeur à une période où la température et l'humidité du sol sont favorables à la minéralisation de la matière organique. Ces résultats issus de l'étude des pratiques des exploitants de la zone correspondent aux situations identifiées, entre autres, par Sebillotte et Meynard (1990) et Baize (1993), comme présentant un risque élevé de lixiviation des nitrates.

La profondeur du sol exploitable par les racines et la capacité de stockage en eau du sol participent aux processus mis en jeu dans les fuites en nitrates sous les parcelles agricoles aux niveaux :

- de la couverture des besoins en eau de la culture, donc des risques culturels face aux aléas climatiques (sécheresse);
- de l'état hydrique du sol, donc de la capacité de minéralisation des matières organiques;
- du drainage du sol, donc de la rapidité de transfert des nitrates hors de la zone d'utilisation par les végétaux.

Nous avons donc inclus les valeurs de la réserve en eau utile des sols (R.U.) dans le Système d'Information Géographique (S.I.G.) élaboré sur la zone du Migennois en tant qu'outil d'aide à l'étude et à la réduction des pollutions diffuses par les nitrates d'origine agricole.

La zone du Migennois définie dans cette étude couvre près

de 400 km², au nord d'Auxerre, autour de la confluence de l'Yonne avec le Serein et l'Armançon. Elle comporte les vallées de ces rivières et leurs complexes de terrasses ainsi que des plaines et des plateaux mollement vallonnés appartenant à deux des Petites Régions Naturelles définies par Baize (1993) : Champagne Jovinienne et Champagne Humide. Deux feuilles de la carte des sols de l'Yonne à 1/50 000 couvrent cette région : St Florentin (Baize et al., 1977) pour une surface d'environ 150 km² et Joigny (Baize et Voilliot, 1988) pour 250 km². La zone intéressée par le S.I.G. concerne 32 854 ha de sols cartographiés répartis en 60 unités de sols (U.S.) dont les dénominations ont été définies par le pédologue de la façon la plus compréhensible qui soit pour les utilisateurs (Baize et al., 1977). Il s'agit d'unités simples ou, pour 8 d'entre elles, d'unités complexes. Dans ce cas, les notices donnent des informations sur les règles de distribution des types de sols au sein de l'unité dans le paysage, mais pas sur la part respective de chacun d'eux dans l'unité. Dans la mesure où des profils caractéristiques de ces unités sont indiqués, nous les avons alors traitées comme les unités simples. Les deux études pédologiques renseignent sur les caractéristiques analytiques des profils décrits et analysés lors de la prospection pédologique et ces valeurs sont données horizon par horizon. Chaque profil est rattaché à une U.S. sur la base de sa localisation.

La constitution de la base cartographique du S.I.G. qui donne la répartition spatiale des différentes U.S. a été obtenue par digitalisation des contours des polygones de la carte pédologique sur support papier. Ce travail a soulevé deux difficultés principales :

- La première est le repérage des points d'amer sur la partie de la carte pédologique concernée, ceux-ci ne figurant pas sur le fond topographique constituant le support de cette carte. Or cette information est indispensable pour géoréférencer la couche d'information sur les sols.

- La deuxième concerne la zone de raccordement entre les deux feuilles couvrant le périmètre étudié. Il n'y a pas toujours continuité dans les contours ni concordance entre les unités de sols cartographiées. Sur la base des informations fournies dans la notice, nous avons alors jugé si l'identité ou l'équivalence des plages en limite des feuilles autorisait d'effectuer un regroupement sans ambiguïté. Dans les autres cas, nous avons respecté les différences entre les deux études, partant du principe que les règles d'association des observations pédologiques en unités de sols sont établies pour chaque carte par le pédologue chargé de l'étude.

Par ailleurs, les informations disponibles dans les deux études sont insuffisantes pour informer la table attributaire avec les valeurs de R.U. de chaque polygone, objet identifié dans la base cartographique. Seule l'étude pédologique de Joigny indique pour 38 U.S., soit 21 485 ha (65 % du périmètre), des fourchettes de valeurs de R.U. minimales et

maximales, représentant les situations les plus favorables comme les plus défavorables pour chaque U.S. dans la zone cartographiée (Baize et Voilliot, 1988). Aucune des deux études pédologiques ne donne les valeurs des paramètres permettant une estimation de la R.U. sur l'ensemble du périmètre. L'acquisition des données manquantes constitue un travail de prospection pédologique qui ne pouvait être réalisé avec les moyens et dans le temps impartis à l'étude. Nous avons donc eu recours à des Fonctions de Pédotransfert (FPT) reliant des propriétés hydriques du sol aux caractéristiques des sols disponibles dans les études pédologiques couvrant la zone et permettant alors d'estimer la R.U. pour 46 U.S., soit 30563 ha (93 % du périmètre).

Plusieurs auteurs ont d'ailleurs récemment examiné l'intérêt d'utiliser de telles fonctions pour évaluer à partir de données plus fréquemment disponibles ou d'acquisition plus aisée, des paramètres du sol fastidieux et coûteux à déterminer (Thomasson et Jones, 1989; Bruand et al., 1996; Bastet et al., 1998; Kravchenko et Zhang, 1998; Tomasella et Hodnett, 1998; Schaap et al., 1998). La constitution de bases de données sur les sols fait l'objet de différents programmes depuis plusieurs années (King, 1984; Girard et al., 1989; Chrétien et al., 1993; Favrot et al., 1994; Jamagne, 1995; King et al., 1995) et, dans une présentation synthétique des travaux français, Jamagne et al. (1996) distinguent deux démarches selon que le travail d'informatisation s'effectue dans le même temps que l'étude pédologique ou qu'il lui est postérieur. Nous sommes ici dans le second cas.

L'objet de cet article est de comparer différentes méthodes d'estimation de la R.U. en vue d'élaborer un S.I.G. pour une problématique environnementale à l'échelle d'un territoire de quelques centaines de km². Réalisant un travail thématique à partir des informations contenues dans des études existantes, nous discutons d'un certain nombre de choix dans une perspective d'application concrète des études pédologiques et nous comparons diverses méthodes utilisables pour estimer la R.U. des sols.

CHOIX DES METHODES D'ESTIMATION DE LA R.U.

Echantillons de données disponibles

Notre propos n'est pas de valider les méthodes d'évaluation utilisées mais d'analyser leur adéquation à un travail d'exploitation de données existantes pour l'élaboration d'un S.I.G. Le choix d'une méthode d'estimation de la R.U. repose sur la confrontation des valeurs obtenues à l'aide des FPT avec les fourchettes de valeurs fournies par le pédologue retenues comme références au terrain. Ces valeurs constituent l'échantillon dit « carte ». Pour chaque U.S., à partir des valeurs

maximales (RU-cartemax) et minimales (RU-cartemin) indiquées, nous avons également calculé une moyenne arithmétique (RU-cartemoy). Pour établir les comparaisons, nous disposons de données analytiques provenant de deux sources.

- Un échantillon, dit « étude pédologique », correspond à 111 profils représentant 32 U.S. pour lesquelles la comparaison est possible avec l'échantillon « carte » (voir en annexe). L'estimation de la R.U. par les FPT est établie à partir des informations analytiques élémentaires disponibles au niveau des horizons, puis la somme est faite pour chaque profil. Ensuite, pour chaque U.S., la R.U. retenue est la moyenne arithmétique des valeurs des profils, assortie d'une fourchette de variation correspondant aux valeurs de profils calculées minimale et maximale. Nous avons retenu ce mode de calcul, de préférence à une estimation pour un profil type représentatif de l'U.S., en raison de la variabilité de l'épaisseur et du nombre d'horizons entre les profils d'une même unité. Le nombre de profils par U.S. varie de 1 à 11, limitant donc l'utilisation des paramètres statistiques de dispersion des valeurs. Les matériaux des horizons couvrent une gamme étendue de composition granulométrique (figure 1a).

- Nos propres mesures, réalisées au cours de deux campagnes (1994-1995 et 1995-1996) de suivi hivernal des teneurs en nitrates du sol, constituent un échantillon, dit « terrain », de 16 profils implantés dans des parcelles cultivées. Sélectionnées sur la base du niveau de risque polluant lié au système de culture, ces parcelles se situent aussi bien en vallée, sur des versants que sur les plateaux. Le rattachement des profils sur la base de la localisation à 8 U.S., toutes contenues dans l'échantillon « carte », a été confirmé par la confrontation des indications des études pédologiques aux observations morphologiques réalisées au cours des sondages. Les compositions granulométriques des horizons contiennent moins de 50 % de sable (figure 1b).

Méthodes d'estimation de la R.U.

La réserve en eau du sol utilisable par les plantes correspond à la quantité d'eau stockée dans un certain volume de sol entre les valeurs d'humidité limites correspondant à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. L'estimation de la R.U. requiert la connaissance de quatre paramètres (Jamagne et al., 1977; Baize et Jabiol, 1995).

- L'humidité massique à la capacité au champ (W1) est parfois remplacée par les valeurs de l'humidité à la capacité de rétention ou par l'humidité équivalente (Baize, 1988), voire par l'humidité à pF3. L'étude pédologique de Joigny indique des valeurs d'humidité équivalente pour certains profils, mais nous ne les avons pas utilisées pour l'estimation des R.U. dans les comparaisons de méthodes, estimant que les fourchettes des valeurs « carte » les prennent déjà en

Figure 1a - Composition granulométrique des horizons de l'échantillon "étude pédologique"

Figure 1a - Particle-size distribution of horizons of the "pedological study" sample (331 horizons)

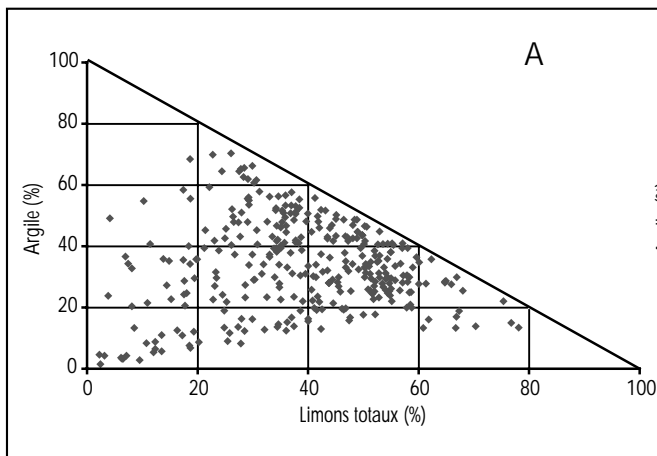
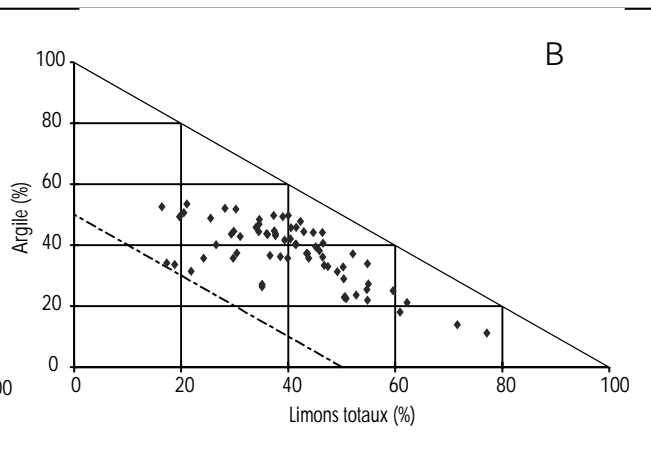


Figure 1b - Composition granulométrique des horizons de l'échantillon "terrain"

Figure 1b - Particle-size distribution of horizons in the "field" sample (70 horizons)



compte.

- L'humidité massique au point de flétrissement permanent (W2) n'est pas indiquée dans les études pédologiques.

- La densité apparente, intervient ici pour calculer, à partir de la valeur massique d'humidité, l'expression volumique de la teneur en eau (lame d'eau en mm). En l'absence d'information dans les deux études pédologiques, nous avons estimé des valeurs de densité apparente à dire d'expert (Voilliot, comm. pers.) sur la base d'autres études de sols réalisées à proximité ou dans cette zone (Voilliot et al., 1984). Elles sont identiques pour toutes les U.S. et croissantes, par tranche de 20 cm, depuis les horizons de surface vers la profondeur (tableau 1). Dans les cas où ces intervalles ne correspondent pas avec les limites des horizons nous avons pris en compte une valeur interpolée.

- La profondeur du sol fixe le volume de sol pris en compte et doit correspondre à la profondeur du système racinaire, qui est un paramètre très variable. Elle correspond à la somme des épaisseurs de chaque horizon des profils et nous avons retenu pour tous les profils la profondeur maximale indiquée dans l'étude pédologique. La R.U. ainsi obtenue constitue une valeur maximale correspondant aux cas où les racines exploitent toute la profondeur de sol définie par le pédologue.

Un terme correctif est introduit pour tenir compte de l'importance des éléments grossiers dans la mesure où l'on estime que ceux-ci ne participent pas au stockage de l'eau du sol utilisable par les plantes. Dans la zone, les éléments grossiers sont dénués de réserve en eau (Baize et Voilliot, 1988). Nous effectuons donc cette correction à partir des teneurs en éléments grossiers données dans les études pédologiques.

Parmi les diverses FPT indiquées dans la littérature pour évaluer la R.U., nous avons retenu celles qui, utilisant les

données disponibles dans les études pédologiques (composition granulométrique, teneur en matières organiques), sont d'usage le plus courant compte tenu de notre objectif initial de pragmatisme. Par ailleurs, en raison de la diversité des compositions granulométriques des échantillons, nous n'avons pas retenu des FPT établies pour des sols de texture plus précisément définie, argileuse (Bruand, 1990), limoneuse (Arrouays et Jamagne, 1993) ou encore sableuse à limono-sableuse (Salter et al., 1966). Les FPT utilisées se regroupent en deux familles selon qu'elles sont basées sur des équations ou sur des valeurs par classe de texture. Nous disposons également de valeurs mesurées directement par nos soins.

Méthodes par calcul d'équations

L'humidité massique à la capacité au champ (W1) est estimée avec les formules de :

- Gras : RU-gras (Chiaverni et Gras, 1977) :

$$W1 = 0,59 A + 0,16 Lf + 5,47 \text{ (si } W1 > 20\%)$$

Tableau 1 - Valeurs de la densité apparente fixée « à dire d'expert »

Table 1 - Values of expert estimated bulk density used in calculations of AWS

Profondeur (cm)	Densité apparente
0 - 20	1,3
20 - 40	1,4
40 - 60	1,5
> 60	1,6

$$W1 = 0,51 A + 0,14 Lf + 7,35 \text{ (si } W1 < 20\%)$$

qui exprime l'humidité pondérale à la capacité de rétention, en fonction de la composition granulométrique en argile (A) et limons fins (Lf); un terme additif (Tc) lié à la teneur en matière organique (MO %) intervient lorsque cette dernière est > 1 % :

$$Tc = 0,75 (MO-1) + 0,93$$

- Osty : RU-osty (Osty, 1971) :

$$W1 = 0,494 A + 0,218 Lf + 0,079 (Lg+Sf) + 0,008 Sg$$

qui exprime l'humidité pondérale à pF 3 en fonction de la composition granulométrique en argile (A), limons fins (Lf), limons grossiers (Lg), sables fins (Sf) et sables grossiers (Sg).

Dans ces deux cas, la valeur de l'humidité au point de flétrissement permanent (W2) est prise égale à la moitié de l'humidité W1 (Baize et Jabiol, 1995).

Méthodes texturales

Les deux méthodes utilisées fournissent directement une valeur volumique (en mm) de la R.U., à partir de la classe texturale du sol qui est déterminée manuellement par report de la composition granulométrique sur les triangles de texture fournis par les auteurs :

- Station Agronomique de l'Aisne : RU-aisne, (Jamagne et al., 1977; valeurs complétées et corrigées par Baize, 1988); des valeurs de densité apparente sont également fournies pour chaque classe texturale.

- Station expérimentale de Rothamsted : RU-roth, (Hall et al., 1977; valeurs complétées et actualisées par Thomasson et Jones, 1989); prend en compte une stratification selon le type d'horizon, distinguant A de B et C et, pour ces deux derniers types, selon la densité apparente, faible, moyenne ou forte. Elle diffère sensiblement de la méthode française sur deux points, d'une part, la limite entre les limons et les sables est à 60 µm et, d'autre part, l'humidité à la capacité au champ correspond à une énergie de rétention de 50 kPa.

Valeurs mesurées

Sur les prélèvements de sol de l'échantillon « terrain », après remaniement par séchage et broyage, nous avons déterminé les valeurs d'humidité équivalente (centrifugation à 1 000 g) et au point de flétrissement permanent (presse à membrane au pF 4,2). Au cours des campagnes de suivi in situ, les valeurs d'humidité mesurées sur les échantillons avant dosage des nitrates permettent de déterminer une valeur de l'humidité à la capacité au champ par la méthode « des

paliers » (Bétrémieux, 1975 cité par Mériaux, 1979). Nous disposons ainsi pour l'échantillon « terrain » de deux méthodes supplémentaires d'estimation de la R.U. par mesure de W1 et W2 :

- humidité équivalente et point de flétrissement permanent : RU-tereq;

- méthode des paliers et point de flétrissement permanent : RU-terpal.

Nous faisons l'hypothèse que la profondeur, constante pendant toute la campagne, des prélèvements réalisés manuellement à la tarière par tranche d'épaisseur de 20 cm, correspond à la profondeur maximale d'enracinement des plantes.

COMPARAISONS ENTRE METHODES

La comparaison entre les méthodes utilisées porte sur la confrontation à l'intervalle de valeur de l'échantillon « carte » (RU-cartemax et RU-cartemin) des résultats obtenus par chacune d'elles pour chacun des deux autres échantillons (tableau 2) : position dans la fourchette, prise en compte de la variabilité et de la hiérarchie des valeurs entre les U.S.

Influence de l'estimation des densités apparentes

Sur l'échantillon « terrain », les différences de valeurs de R.U. calculées en prenant en compte, pour la conversion des humidités massiques en volumiques, des densités apparentes issues des données de la station de l'Aisne et de l'évaluation par expert sont faibles. Tant pour l'estimation de la RU par calcul (RU-gras et RU-osty)

Tableau 2 - Méthodes d'estimation de la R.U. utilisées et échantillons correspondants.

Table 2 - Methods used for estimating AWS and corresponding samples

		Echantillon	
		Etude	Terrain
Nombre U.S.		32	8
Nombre profils		111	16
Méthode d'estimation			
par calcul	RU-gras	+	+
	RU-osty	+	+
par texture	RU-aisne	+	+
	RU-roth	+	+
par mesures	RU-tereq		+
	RU-terpal		+
Référence carte (fourchette : RU-cartemin, RU-cartemax et RU-cartemoy calculée)		+	+

Tableau 3 - Corrélations entre les RU calculées avec deux modes d'estimation de la densité apparente (données de l'Aisne et dire d'expert) sur l'échantillon « terrain », au niveau des horizons et des profils.

Table 3 - Correlations for « field » sample between AWS calculated with two estimated values of bulk density (data from Aisne and from expert estimation), for horizons and profiles.

$$Y = aX + b;$$

X : RU calculée avec Da de l'Aisne; Y: RU calculée avec Da d'expert,

Echantillon	Horizons (n = 70)			Profils (n = 16)		
	r ²	a	b	r ²	a	b
RU-gras	0,81	0,97	1,48	0,99	1,06	11,52
RU-osty	0,74	0,90	+4,03	0,99	1,07	9,50
RU-tereq	0,83	1,05	-2,33	1,00	1,08	-15,82
RU-terpal	0,92	0,90	+2,56	1,00	1,04	-4,35

qu'avec des mesures (RU-tereq et RU-terpal), les coefficients de corrélation (r²) entre les valeurs de R.U. prises deux à deux pour chaque méthode varient de 0,74 à 0,92 au niveau des horizons et de 0,99 à 1,00 quand on considère les profils entiers (tableau 3). Pour l'échantillon « étude pédologique », les coefficients de corrélations entre les valeurs prises par chaque U.S. sont de 0,99 pour les méthodes RU-gras et RU-osty.

Dans la suite, travaillant sur les valeurs de R.U. par profil et

par souci de simplification, nous ne retenons que les RU estimées avec les densités apparentes de la station de l'Aisne. Ce choix est justifié, en relation avec le caractère appliqué de ce travail, par la facilité d'accès à cette information, le recours à expert n'étant pas toujours possible.

Echantillon terrain

Sur les bases, d'une part, de la position des R.U. estimées pour chacun des 16 profils par rapport à la fourchette « carte » (figure 2) et, d'autre part, de la dispersion des valeurs pour l'échantillon « terrain » tous profils confondus (figure 3), les méthodes utilisées se classent en trois groupes :

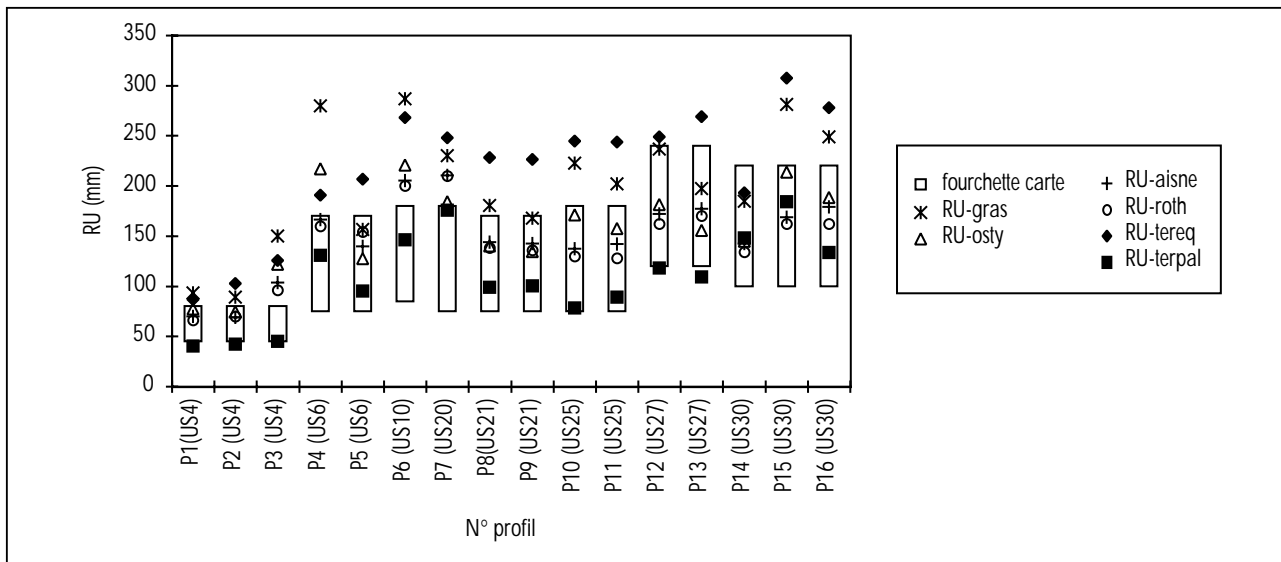
- RU-gras et RU-tereq donnent des valeurs qui ne se placent respectivement que 4 et 1 fois (sur 16) dans la fourchette « carte ». Elles sont également les plus élevées et les plus dispersées, les moyennes de l'échantillon tous profils confondus sont supérieures à la moyenne des RU-cartemax pour les deux méthodes ;

- RU-aisne, RU-roth et RU-osty donnent des valeurs qui se placent respectivement 13, 13 et 12 fois (sur 16) dans la fourchette « carte », elles sont intermédiaires, moins dispersées et souvent voisines, les moyennes de l'échantillon tous profils confondus sont comprises entre les valeurs de la moyenne des RU-cartemin et des RU-cartemax pour ces trois méthodes ;

- RU-terpal donne des valeurs qui se situent 12 fois (sur 16) dans la fourchette « carte ». Elles sont généralement les plus faibles et sont plus groupées, la moyenne de l'échantillon est comprise dans l'intervalle entre les moyennes des RU-cartemin et des RU-carte-

Figure 2 - RU par profil, échantillon «terrain»

Figure 2 - AWS of profiles, «field» sample



max.

Echantillon étude
pédologique

La comparaison entre les résultats de R.U. obtenus par les quatre méthodes d'estimation avec les R.U. « carte » concerne :

- la position de la R.U. moyenne calculée pour chaque U.S. par rapport à la fourchette « carte » ;
- la variabilité des R.U. calculées toutes U.S. confondues ;
- la distribution des R.U. moyennes des U.S. dans des classes de valeurs.

Position dans la fourchette
carte

Pour 6 des 32 U.S., soit 3523 ha (16 % de la surface de l'échantillon carte) aucune des valeurs moyennes de R.U. estimées ne se situe dans la fourchette définie dans l'étude pédologique (figure 4). Pour l'U.S. 31, les R.U. calculées sont surestimées par rapport aux indications de la carte, elles sont par contre sous-estimées pour les autres (U.S. 11, 14, 46, 48 et 57). Dans un cas (U.S. 14), nous ne disposons de données analytiques que pour un seul profil et pour deux autres (U.S. 46 et 57), les données proviennent de profils décrits dans l'étude de St. Florentin. Le nombre de valeurs de R.U. moyennes estimées situées dans la fourchette carte sont, par ordre décroissant : RU-roth (20 fois sur 32), RU-osty (19), RU-aisne (18) et RU-gras (13).

Variabilité des R.U. entre les
U.S.

La variabilité des R.U., tant minimales que maximales, obtenues par les FPT par U.S. est toujours supérieure à celle indiquée par les R.U. « carte » (figure 5). Les valeurs RU-gras sont à la fois les plus élevées et les plus dispersées (écart-type le plus fort), les valeurs RU-aisne sont les plus faibles et les valeurs RU-roth les moins dispersées. Une analyse de variance appliquée séparément aux RU maxi-

Figure 3 - Dispersion des RU estimées pour l'ensemble des profils de l'échantillon «terrain»

Figure 3 - Variability of AWS estimated for all the profiles of the «field» sample

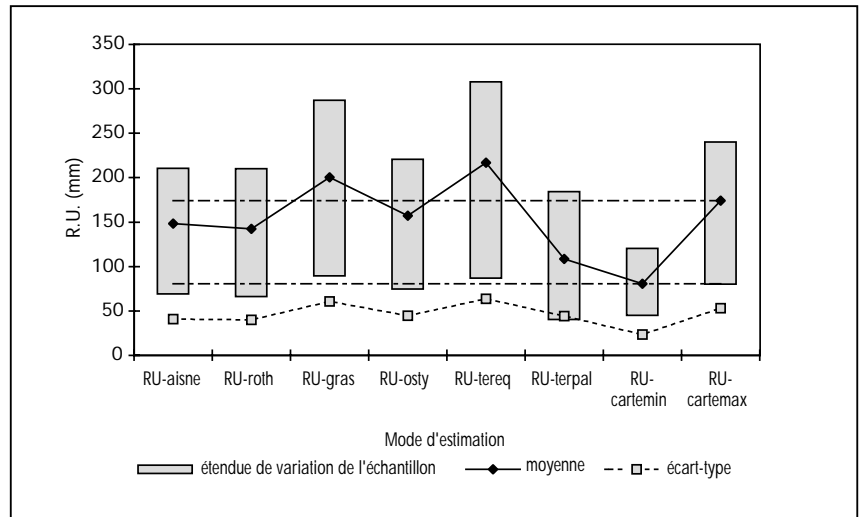


Figure 4 - Valeurs de RU estimée et fourchette carte par unité de sol, échantillon "étude pédologique"

Figure 4 - Estimated values of AWS and map range for each soil unit, "pedological study" sample

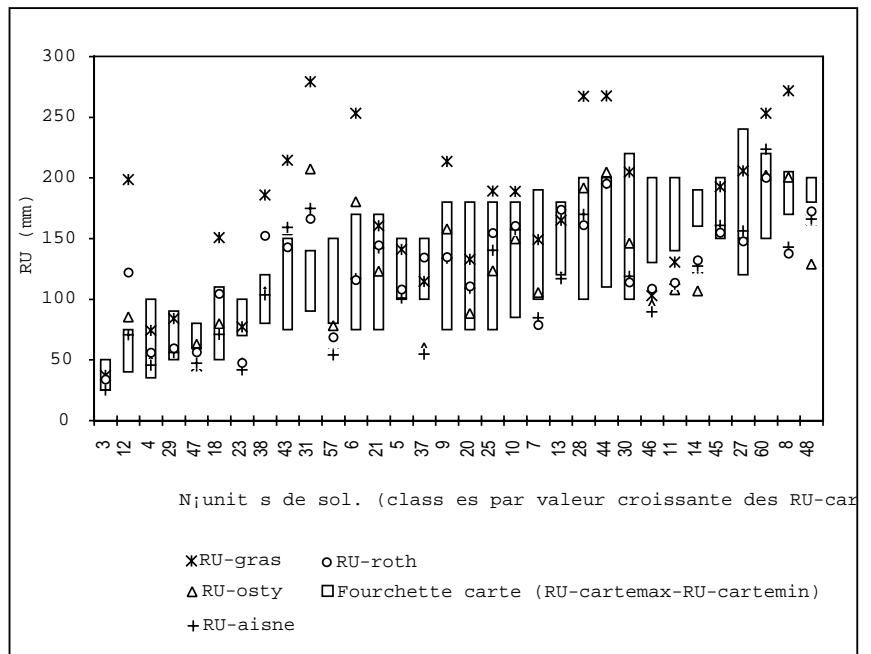


Figure 5 - Dispersion des valeurs de RU par unité de sol, échantillon "étude pédologique"

Figure 5 - Dispersion of AWS values by S.U., "pedological study" sample

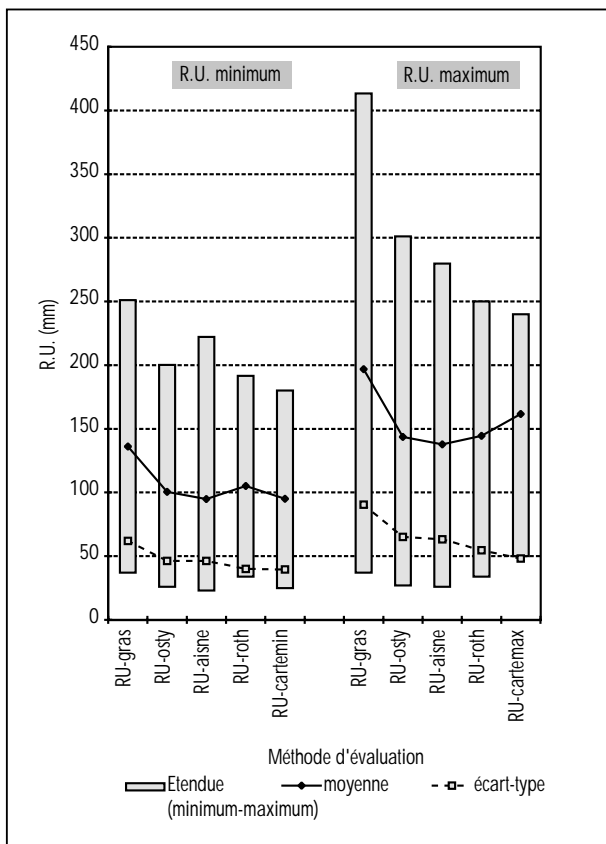


Tableau 5 - Coefficients de corrélation (r^2) entre les RU estimées et les R.U. « carte », calculées pour les valeurs maximum, minimum et moyenne pour chaque U.S. pour l'échantillon « étude pédologique ».

Table 5 - Correlation coefficient (r^2) between estimated AWS and map AWS, calculated for maximum, minimum and mean values for each S.U. for pedological study sample.

	RU-gras	RU-osty	RU-aisne	RU-roth
minimum	0,10	0,23	0,29	0,24
maximum	0,41	0,54	0,60	0,53
moyenne	0,25	0,42	0,51	0,43

males et RU minimales par U.S., indique des différences statistiquement significatives entre les valeurs obtenues par les différentes FPT et la référence carte. Elle discrimine les deux séries de valeurs en deux groupes distincts (test de Newman-Keuls à 1 et 5 %), d'une part RU-gras, et d'autre part RU-aisne, RU-roth, RU-osty et RU-cartemoy (tableau 4).

Les valeurs du coefficient de corrélation (r^2) entre les RU estimées et la référence « carte » de chaque U.S. sont dans l'ensemble plus élevées pour les valeurs maximales que pour les minimales (tableau 5). Pour les valeurs moyennes, la meilleure détermination est obtenue par RU-aisne ($r^2 = 0,51$), la moins bonne par RU-gras ($r^2 = 0,25$).

Classement des R.U.

Tableau 4 - R.U moyennes par méthodes : écart-type et groupes de valeurs homogènes (test de Newman-Keuls à 5 % et à 1 %) pour l'échantillon « étude pédologique ».

Table 4 - mean AWS mean : standard deviation and groups (Newman-Keuls test at 5 % and at 1 %) for pedological study sample.

	Mode d'estimation	Moyenne (mm)	Écart-type	Groupes à 5 %	Groupes à 1 %
RU maximale	RU-gras	197	90	A *	A B
	RU-cartemax	162	48	B	A B
	RU-roth	145	55	B	B
	RU-osty	144	65	B	B
	RU-aisne	138	63	B	B
RU minimale	RU-gras	137	62	A	A
	RU-roth	105	40	B	B
	RU-osty	100	46	B	B
	RU-cartemin	95	40	B	B
	RU-aisne	95	46	B	B

* A, B, groupes de valeurs homogènes

La représentation cartographique dans le S.I.G. conduit à répartir les valeurs moyennes des R.U. de chaque U.S. en classes dont nous avons fixé les seuils avec un pas fixe de 50 mm. Par rapport à la classe de référence prise par la donnée RU-cartemoy, le classement n'est inchangé que pour 4 U.S. (U.S. 3, 5, 29 et 45), et pour 8 d'entre elles aucune valeur estimée ne se situe dans la même classe (figure 6). Pour les autres, les écarts de classement varient de 1 à 3 classes en

plus ou en moins. La répartition des écarts de classement entre les R.U. estimées et la référence carte de chaque U.S. indique une concordance de qualité équivalente entre les 3 méthodes, RU-roth, RU-aisne et RU-osty, et une surestimation plus importante par R.U.-gras (tableau 6).

Pour une approche globale au niveau de la zone cartographiée, nous avons ensuite calculé la surface représentée par chaque classe de R.U. (figure 7). La comparaison avec la référence carte, montre que RU-osty surestime la contribution de la classe 50-100 mm, RU-roth celle de la classe 100-150 mm, RU-gras celle des classes supérieures à 201 mm et que pour la classe 150-200 mm, toutes les méthodes aboutissent à des valeurs inférieures à la référence carte. Sauf pour la classe 0-50 mm, RU-aisne donne des estimations intermédiaires.

Tableau 6 - Fréquence des écarts de classement des R.U. estimées et RU-carte par U.S. pour l'échantillon « étude pédologique ».

Table 6 - Frequency of rank differences between estimated AWS and map AWS, by S.U. for « pedological study » sample.

Ecart de RU-gras	RU-osty	RU-aisne	RU-roth	classe(*)
-3	0	0	0	0
-2	0	1	1	0
-1	5	9	10	9
0	10	14	14	15
1	6	7	7	7
2	8	1	0	1
3	3	0	0	0

* : écart = classe RU estimée - classe RU-cartemoy

DISCUSSION

Les résultats obtenus dans ce travail mettent en évidence des écarts importants entre les valeurs de R.U. estimées de différentes façons. Cette constatation rejoint celle d'Arrouays et Jamagne (1993) sur le risque de biais introduit par l'utilisation de méthodes dans des conditions ne correspondant pas à celles de leur établissement. Une autre source d'écart est liée à la variabilité spatiale des sols, même après regroupement par le pédologue en unités jugées suffisamment homogènes au niveau du territoire cartographié et en fonction de l'échelle de travail. La prise en compte de fourchettes de variation pour caractériser chaque U.S. permet de minimiser cet effet, mais elle n'est possible que dans la mesure où les données de plu-

Figure 6 - Classement des unités de sol selon les méthodes, échantillon "étude pédologique"
 Figure 6 - Classification of the U.S. according to the methods, "pedological study" sample

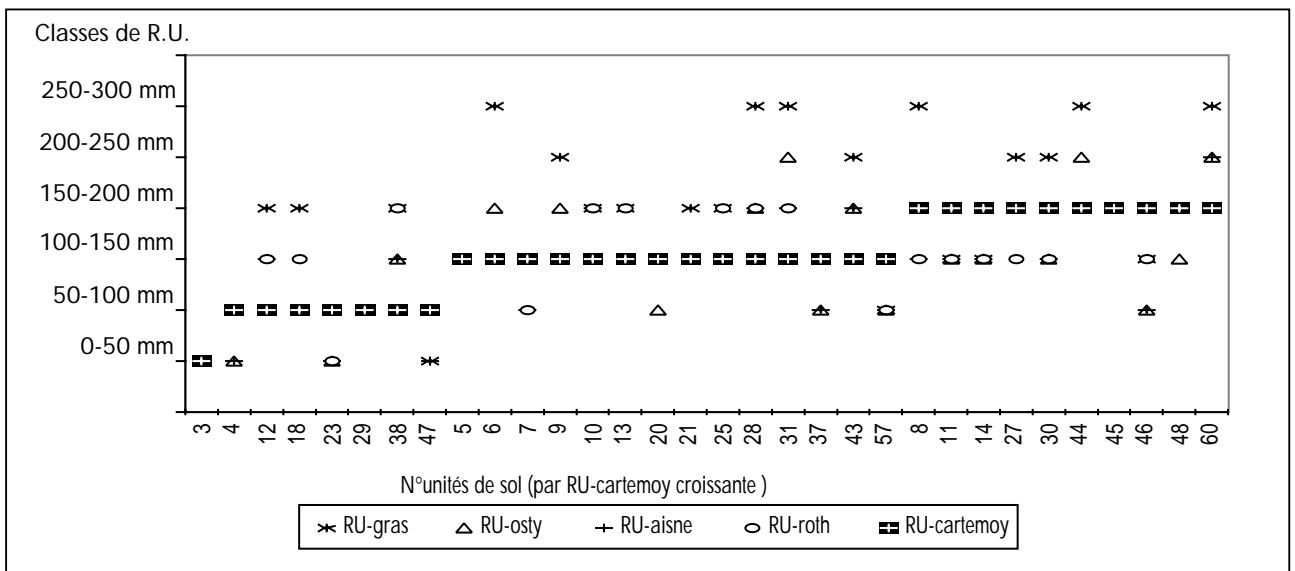
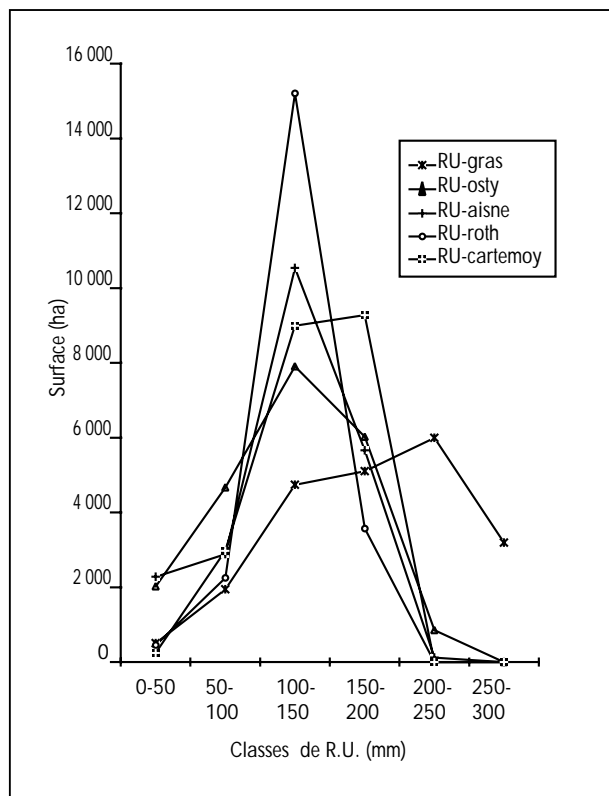


Figure 7 - Répartition spatiale des unités de sol par classes de RU selon les méthodes, échantillon "étude pédologique"
 Figure 7 - Space distribution of soil units by AWS classes (of 50 mm) according to the methods, "pedological study" sample



sieurs profils sont disponibles pour chaque unité.

Les FPT utilisées sous forme d'équation à partir de caractéristiques analytiques ou de valeurs données dans des tables sur la base de la texture, reposent sur des relations statistiques établies entre la composition granulométrique et les propriétés hydriques des sols. Dans nos conditions, sauf la formule de Gras qui surestime de façon générale les valeurs de R.U., les autres fournissent des résultats assez voisins entre eux. Dans RU-gras, le terme correctif qui tient compte de la teneur en matière organique, accroît suivant les U.S. les valeurs calculées de 1 à 11 mm. Il n'explique donc pas la totalité de l'écart avec les autres estimations. La concordance des R.U. estimées pour chaque U.S. avec les indications de l'étude pédologique est cependant faible ($r^2 \approx 0,5$). La prise en compte globale des valeurs à l'échelle de l'échantillon « étude pédologique » montre que les différences obtenues ne sont pas statistiquement significatives. Faute de mieux, dans le cadre d'une application pratique, le choix entre les différentes FPT se fera donc en fonction de la commodité de mise en oeuvre. L'application d'une formule est facile si les données sont dispo-

nibles sur un tableur et dans ce cas la formule d'Osty nous a fourni de meilleurs résultats. L'amélioration de l'utilisation des données basées sur les classes de texture passe par la possibilité d'un traitement informatique des compositions granulométriques afin de s'affranchir de la détermination manuelle des classes texturales, en faisant cependant attention à utiliser le triangle spécifique à la méthode. Dans ce cas, malgré les différences déjà signalées, les deux méthodes à partir des données de l'Aisne et de Rothamsted nous ont fourni des résultats sensiblement équivalents.

Nous avons pu montrer, pour cet exemple, que la valeur de la densité apparente prise en compte pour convertir en volume l'expression massique de l'humidité du sol, pouvait être définie de façon équivalente à dire d'expert ou à partir des données de la Station de l'Aisne, d'autant que la R.U. est estimée au niveau du profil entier. Cependant, nous n'oublions pas que la densité apparente traduit également le mode d'assemblage des constituants du sol qui est en relation avec la géométrie de l'espace poral et intervient donc dans la capacité de stockage en eau du sol (Reeve et al., 1973; Bruand, 1990; Tessier, 1994).

L'utilisation de mesures directes ne peut s'envisager dans ce genre de travail qu'à titre de complément d'autres méthodes. Nos résultats indiquent la préférence pour les données issues d'un suivi de terrain, d'autant que la détermination au laboratoire est faite sur des échantillons remaniés par séchage et tamisage, entraînant des changements dans les valeurs de l'humidité de rétention conformément à des observations antérieures (Trouche, 1981; Bruand et al., 1996). La méthode des paliers est cependant dépendante des moyens disponibles pour réaliser un nombre suffisamment important de prélèvements ainsi que des événements climatiques, en particulier les conditions hydriques qui provoquent l'humectation du sol.

CONCLUSION

Le travail présenté dans cet article se voulait aussi proche que possible des conditions d'élaboration d'une application thématique d'études pédologiques. Cependant, sans être nécessairement spécialiste de science du sol, une connaissance suffisante de la pédologie est indispensable au chargé d'étude pour s'assurer d'une certaine fiabilité des résultats, compte tenu des choix et des arbitrages parfois nécessaires lors de l'acquisition des données. La signification des informations est liée au niveau d'approche du territoire à qualifier, depuis le profil jusqu'à l'unité de sol puis la petite région.

Dans les cas fréquents où les paramètres nécessaires à l'estimation d'une caractéristique du sol ne sont pas directement disponibles, le recours à des FPT doit s'accompagner de la plus grande prudence dans le choix du modèle, en portant une attention particulière aux limites de validité, à la représentativité spatiale des données et à leur combinaison. Et, sauf à

retrouver les articles originaux où l'auteur renseigne sur les conditions expérimentales, ces informations se perdent bien souvent au fur et à mesure des reprises bibliographiques en cascade, d'autant plus que certaines formules proviennent de documents à diffusion restreinte.

Enfin, nos remarques relatives à l'outil informatique vont dans le même sens que celles de Baize et King (1991) ; la lourdeur du travail de saisie est compensée par la puissance de traitement et de restitution de l'information. Ainsi, après croisement avec l'occupation du sol à deux époques entourant la période d'augmentation brutale des teneurs en nitrate des eaux de captages, nous avons mis en évidence l'existence de retournements de prairies permanentes pour mise en culture sur des sols de vallée à faible R.U., vérifiant ainsi une hypothèse formulée au cours de notre travail en appui à l'O.G.A.F. du Migiennois.

REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie d'une recherche financée par le Conseil Régional de Bourgogne, l'Agence de l'Eau Seine Normandie, l'OGAF du Migiennois, le Conseil Général de l'Yonne et l'INRA.

Il a été le support en 1995-1996 et 1996-1997 d'activités thématiques de troisième année d'élèves Ingénieurs de l'ENESAD encadrées avec J.L. Maigrot : S. De Sadeleer, M.P. Meunier, C. Coillot-Egea, S. Lagrave et S. Victoor.

Les auteurs remercient J.P. Voilliot et D. Baize pour leur collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Jamagne M., 1993 - Sur la possibilité d'estimer les propriétés de rétention en eau de sols limoneux lessivés hydromorphes du sud-ouest de la France à partir de leurs caractéristiques de constitution. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 79, 1, pp 111-121.
- Baize D., 1988 - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris, 1 vol., 172 p.
- Baize D., 1993 - Petites régions naturelles et « paysages pédologiques » de l'Yonne, carte à 1/200 000. INRA, Conseil Général de l'Yonne, 191 p.
- Baize D., Jabiol B., 1995 - Guide pour la description des sols. INRA, Paris, 1 vol., 375 p.
- Baize D., King D., 1991 - La modélisation spatiale des couvertures pédologiques « Carte papier » et S.I.G., in : *Gestion de l'espace rural et SIG*. sémin. Florac, INRA, pp 17-27.
- Baize D., Voilliot J.P., 1988 - Carte des sols de l'Yonne. Feuille de Joigny. Notice et carte à 1/50 000, Station Agronomique de l'Yonne, Auxerre, 127 p.
- Baize D., Voilliot J.P., Chretien J., 1977 - Carte des sols de l'Yonne. Feuille de Saint Florentin. Notice et carte à 1/50 000, Station Agronomique de l'Yonne, Auxerre, 128 p.
- Bastet G., Bruand A., Quélin P., 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 7-28.
- Bruand A., 1990 - Improved prediction of water-retention properties of clayey soils by pedological stratification. *J. Soil Sci.*, 41, pp 491-497.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 1, pp 27-40.
- Chiaverni J., Gras R., 1977 - Comparaison de quelques méthodes d'évaluation au laboratoire de la capacité au champ. *Ann. agron.*, 28, 4, pp 445-461.
- Chrétien J., King D., Hardy R., Meunier D., 1993 - Essai de modélisation de l'organisation spatiale des sols d'une région. Application aux plateaux calcaires bourguignons. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 3, pp 171-191.
- Favrot J.C., Arrouays D., Bornand M., Girard M.C., Hardy R., 1994 - Informatisation et spatialisation de la ressource sol : le programme « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols ». *Cahiers Agric.*, 3, pp 237-246.
- Girard M.C., Arousseau P., King D., Legros J.P., 1989 - Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Science du sol*, 27, 4, pp 335-350.
- Hall D.G.M., Reeve M.J., Thomasson A.J., Wright V.F., 1977 - Water retention, porosity and density of field soils. *Soil Survey Technical Monograph*, Harpenden, 9, 75 p.
- Jamagne M., 1995 - Connaissance spatiale et gestion des ressources en sols. Etat actuel du problème. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 81, 8, pp 75-91.
- Jamagne M., Betremieux R., Begon J.C., Mori A., 1977 - Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. techn. infor.*, 324-325, pp 627-641.
- Jamagne M., Bornand M., Hardy R., Stengel P., 1996 - Soil surveys and soil databases. in : « Soil databases to support sustainable development », C. Le Bas et M. Jamagne édit., INRA, JRC, EC, pp 37-48.
- King D., 1984 - Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. *Agronomie*, 4, 5, pp 461-472.
- King D., Le Bas C., Daroussin J., Thomasson A.J., Jones R.J.A., 1995 - The E.U. map of soil water available for plants. in « European land information system for agro-environmental monitoring », King, Jones, Thomasson édit., Inst. for Remote Sensing Appl., pp 131-141.
- Kravchenko A., Zhang R., 1998 - Estimating the soil water retention from particle-size distributions : a fractal approach. *Soil Sci.* 163, 3, pp 171-179.
- Mériaux S., 1979 - Le sol et l'eau. in « Pédologie, 2 : Constituants du sol », M. Bonneau et B. Souchier, chap. XIV, pp 266-312, Masson édit.
- Morlon P., Soulard C., Guyard P.O., Maigrot J.L., Trouche G., 1996 - Comment traiter un problème de pollution par les nitrates ? Evaluation de l'opération du Migiennois : rapport de synthèse. INRA-SAD, rap. multigr., 98 p. + fig.H.T. + annexes, Dijon
- Morlon P., Trouche G., Soulard C., Maigrot J.L., Guyard P.O., 1998 - Diagnostic de la pollution azotée de l'eau par approche historique multi-échelles. Une étude de cas dans le département de l'Yonne (France). *Cahiers Agricultures*, 7, pp 15-27.
- Osty P.L. 1971 - Influence des constituants du sol sur son humidité à pF 3. *Ann. agron.*, 22, 4, pp 451-476.
- Reeve M.J., Smith P.D., Thomasson A.J., 1973 - The effect of density on water retention properties of field soils. *J. Soil Sci.*, 24,3, pp 355-367.
- Salter P.J., Berry G., Williams J.B., 1966 - The influence of texture on the moisture characteristics of soils. III : quantitative relationships between particle size, composition, and available-water capacity. *J. Soil Sci.*, 17, 1, pp 93-98.
- Schaap M.G., Leij F., Van Genuchten M.Th., 1998 - Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. 16^e Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, 20-26/08, symp. 1, n°486.

- Sebillotte M., Meynard J.M., 1990 - Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. in : « Nitrates, Agriculture, Eau », Calvet R. édit., Paris, INRA, pp 289-312.
- Tessier D., 1994 - Rôle de l'eau sur les propriétés physiques des sols. Sécheresse, 5, pp 143-150.
- Thomasson A.J., Jones R.J.A., 1989 - Land evaluation at regional scale. in « Land qualities in space and time », J. Bouma et A.K. Bregt édit., proceed. symposium ISS, Wageningen, 22-26/08/1988, pp 231-240.
- Tomasella J., Hodnett M.G., 1998 - Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. Soil Sci., 163, 3, pp 190-202.
- Trouche G., 1981 - Aspects agronomiques et hydrodynamiques du drainage des sols à profil différencié du val de Saône. Thèse doct-ing., Inst. Sciences de la Terre, Univ. Dijon, 201 p.
- Voilliot J.P., Darras G., De Cuyper A., 1984 - Etude pédologique des bassins versants du périmètre de Chichery (Yonne). doc. multigraph., 19 p. + annexes, Station Agronomique de l'Yonne.

ANNEXE :

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES U.S DE L'ÉCHANTILLON "ÉTUDE PÉDOLOGIQUE"

MAIN CHARACTERISTICS OF S.U. IN THE "PEDOLOGICAL STUDY" SAMPLE

N° US	NOM US	Surface	RU	RU	RU	RU	RU	RU
		ha	mm	mm	mm	mm	mm	mm
3	sol sablo-limoneux superficiel sur "grève" siliceuse	243	25	50	37	27	25	34
4	complexe de sols peu profonds sur "grève"	1567	35	100	74	49	46	56
5	sol alluvial profond, riche en sables grossiers siliceux	233	100	150	141	105	101	108
6	"lames rouges" profondes	813	75	170	253	180	117	116
7	"lames jaunes" hydromorphes d'Esnon et Cheny	254	100	190	149	106	85	79
8	sol alluvial argileux de Champlay	479	170	205	272	200	143	138
9	complexe de sols profonds sur "grève"	457	75	180	214	158	134	135
10	sol de la terrasse d'Ormoy	224	85	180	189	150	157	160
11	sol profond, à texture équilibrée en surface, argilo-limoneux en profondeur	671	140	200	130	108	112	113
12	sol graveleux, de profondeur moyenne, sur "grève" ancienne	119	40	75	199	85	70	122
13	sol profond, sableux à sablo-limoneux, lessivé	167	120	180	165	118	117	174
14	sol profond, limono-sableux en surface	60	160	190	126	107	127	132
18	sol argilo-limoneux, rougeâtre, à forte charge en silex	602	50	110	151	80	71	104
20	sol très calcaire, assez profond, colluvial, limono-argileux	1661	75	180	133	88	109	111
21	sol calcaire, brun, sur formations crayeuses redistribuées	3130	75	170	160	123	142	144
23	sol calcaire, assez profond, colluvial, argileux	214	70	100	77	48	42	48
25	sol limono-argileux, très calcaire, colluvial, des versants	208	75	180	189	123	140	155
27	sol limono-argileux en surface, argileux en profondeur	2668	120	240	206	154	156	148
28	sol argileux, rougeâtre, non calcaire	1040	100	200	267	192	170	161
29	sol limono-argileux, superficiel, non calcaire, sur craie dure	38	50	90	84	56	56	60
30	sol sur marnes de Brienne et apparentés	2368	100	220	205	146	119	114
31	sol argileux décarbonaté sur formations calcaires de remaniement complexe	486	90	140	279	207	175	166
37	sol profond, gravelo-limoneux ou gravelo-sableux en surface, très lessivé et hydromorphe	105	100	150	115	60	55	134
38	sol peu profond, gravelo-limoneux ou gravelo-sableux à substrat argileux	172	80	120	186	106	103	152
43	sol marron décarbonaté sur formation crayeuse redistribuée	83	75	150	215	157	159	143
44	variante de l'UTS 31 à horizon de surface pauvre en argile	254	110	200	267	205	195	195
45	sol planosolique, limoneux-sableux en surface et argileux en profondeur	483	150	200	192	161	161	155
46	sol planosolique sableux en surface, argilo-sableux en profondeur	1756	130	200	103	95	90	109
47	sol sableux profond	261	60	80	45	63	47	56
48	sol lessivé dégradé, hydromorphe	420	180	200	165	129	166	173
57	sol limoneux caillouteux sur argiles éocènes	130	80	150	55	78	54	69
60	sol de la terrasse de Prady sur Tholon	119	150	220	253	202	223	200