

Représentation cartographique de la sensibilité des sols à l'infiltration hydrique verticale

Carte thématique à l'infiltration verticale

Catherine Cam⁽¹⁾, D. Froger⁽²⁾, J. Moulin⁽³⁾, J. Rassineux⁽¹⁾, J. Servant⁽⁴⁾

1 Chambre d'Agriculture de la Vienne - B.P. 129 - 86004 Poitiers Cedex

2 Chambre d'Agriculture de l'Indre et Loire - B.P. 139 - 37171 Chambray Les Tours Cedex

3 Chambre d'Agriculture de l'Indre - 24, Rue des Ingrains - 36022 Chateauroux Cedex

4 Chambre d'Agriculture du Cher - 3, Rue Volta - 18023 Bourges Cedex

RÉSUMÉ

Les Chambres d'Agriculture du Cher, de l'Indre et Loire, de l'Indre et de la Vienne ont entrepris, au début des années 1980, la réalisation d'une cartographie systématique des sols de ces départements à l'échelle du 1/50.000. Le processus d'édition automatique de ces cartes comporte la création d'un fichier de données sémantiques et géographiques pour chaque feuille, et permet d'effectuer des traitements informatiques pouvant déboucher sur l'édition de cartes thématiques dérivées du fichier de base. Les feuilles déjà éditées sont ainsi accompagnées de quatre cartons thématiques à 1/100.000 (texture superficielle et hydromorphie par extraction directe d'une donnée ; réserve utile et aptitudes agricoles par croisement de plusieurs paramètres). Dans le cadre d'une prise en compte croissante des préoccupations d'ordre environnemental, l'accent a été mis davantage sur les relations sol-eau. Le nouveau type de carte thématique proposé tente ainsi d'apprécier et de spatialiser la sensibilité des différents types de sols à l'infiltration hydrique au niveau de la petite région naturelle. Cette carte thématique est établie à partir de six paramètres ; chacun est un caractère intrinsèque du sol correspondant à une composante de l'infiltration hydrique verticale. Ils sont obtenus à partir des onze données contenues dans le fichier informatique de la carte des sols ; trois de ces paramètres (texture superficielle, présence d'un plancher imperméable et épaisseur du sol) sont connus ou mesurés et sont directement issus des données de base ; un paramètre (réserve utile en eau) est calculé à partir de ces données ; les deux autres (perméabilité du profil, vitesse de percolation), sont interprétés à partir de la connaissance régionale des sols et obtenus par combinaison des données de base. Ces paramètres sont quantifiés et la somme de leur valeur aboutit à la définition de sept classes de sensibilité. Ce classement des sols est à moduler en fonction du contexte géographique, géologique et climatique régional. Ce système de thématisation a été testé sur plusieurs coupures existantes de la carte des sols ; il paraît valide pour les secteurs étudiés. L'exemple présenté est celui de la feuille de Sancerre (Cher). A ce jour, douze feuilles de la carte des sols sont accompagnées de leur carte thématique "sensibilité à l'infiltration", éditée à 1/100000.

Mots clés

Cartographie, pédologie, modélisation, hydrodynamisme, région Centre, département de la Vienne

SUMMARY

CARTOGRAPHIC REPRESENTATION OF THE SOILS ABILITY TO VERTICAL INFILTRATION

THEMATIC MAP OF VERTICAL INFILTRATION

At the beginning of the 80's, the Chambers of Agriculture of Cher, Indre et Loire, Indre and Vienne, started the realization of a systematic cartography of these subdivisions soils with a 1/50.000 scale . The process of automatic of these maps includes the creation of a card-index file made up of semantic and geographic data for every sheet and permits to carry out computer processing which can lead to the edition of thematic maps derived from the source card-index file . The already edited sheets are accompanied with four thematic insets at a 1/100.000 scale (surface texture and hydromorphy by direct extraction of a data ; useful available water and agricultural capacities by crossing of several parameters) .

As part of an increasing consideration for matters of environmental nature, we laid stress more on the soil-water relations . The new proposed type of thematic map tries to estimate and to spatialize the different types of soils ability to the hydrous infiltration at the level of the small natural area .

This thematic map is established from six parameters; each of them is a specific characteristic of the soil corresponding to a component of the vertical hydrous infiltration (figure 2) . They are achieved from the eleven data contained in the computer card-index file of the soils map (figure 1, table 1) ; three of these parameters (surface texture, presence of an impermeable floor and soil thickness) are known or measured and they stem directly from the source data ; one parameter (useful available water) is calculated from these data ; the two others (profile permeability, percolation speed) are interpreted from the regional knowledge of the soils and are achieved with a combination of the source data . These parameters are numbered according to their influences on the infiltration (table 2) . The surface texture intervenes in the penetration of water into the soil ; it is divided among five classes valued between 2 and 20 points (table 3) . The presence of an impermeable floor is an obstacle to the infiltration ; three classes have been determined according to the degree of impermeability of the floor ; they are valued between 5 and 20 points (table 4) . The soil thickness expresses the distance water has to go through ; four classes have been determined, valued between 0 and 15 points (table 5) .

The useful available water reserve appraises the reservoir of the soil ; four classes have been held, valued between 0 and 15 points (table 6).

The profile permeability squares with the speed of the water transfer through the soil ; four classes have been adopted, valued between 0 and 20 points (table 7) . The speed of the percolation into the substratum corresponds with the run-off of water through the substratum or the parent rock ; three classes have been distinguished, valued between 0 and 10 points (table 8) . The amount of the values of each parameter results in a mark on 100 points for each unit of soil ; then seven classes of ability have been defined, represented by one colour on the map (table 9) .

This classification of the soils has to be modulated according to the geographic, geological and climatic context . This thematisation system has been tested and validated on several existing pieces of the soils map . Its validity surface corresponds with the south of the Bassin Parisien and with Poitou (figure 3) . The presented example is the one of the Sancerre sheet (Cher) (figure 4) with the calculation method of the ability to the infiltration for six very different units of soils (Table 10) . To date, twelve sheets of the soils map are accompanied with thei thematic map ability to infiltration edited with a 1/100.000 scale .

Key-words: cartography, pedology, modelisation, hydrodynamism, Région Centre and Department of Vienne .

RESUMEN

REPRESENTACIÓN CARTOGRAFICA DE LA SENSIBILIDAD DE LOS SUELOS A LA INFILTRACIÓN HÍDRICA VERTICAL

Las Cámaras de Agricultura de los departamentos de Cher, Indre et Loire, Indre y Vienne, emprendieron, a comienzos de los años 1980, la realización de una cartografía sistemática de los suelos de dichos departamentos a escala de 1/50.000. El proceso de edición automática de estas mapas implica la creación de un fichero de datos semánticos y geográficos para cada hoja y permite efectuar procesos informáticos que pueden llegar a la edición de mapas temáticos derivados del fichero de base. Las hojas editadas ya, van acompañadas de cuatro mapas de bolsillo temáticos a escala de 1/100.000 (textura superficial e hidromorfía por extracción directa de un dato del fichero ; reservas útiles y aptitudes agrícolas por cruzamiento de varios parámetros).

A fin de considerar cada vez más las preocupaciones relacionadas con el entorno, se puso más el acento en las relaciones suelo-agua. El nuevo tipo de mapa temático propuesto intenta así apreciar y espacializar la sensibilidad de distintos tipos de suelos a la infiltración hidráulica a nivel de la pequeña region natural. Se estableció este mapa temático a partir de seis parámetros ; cada uno de

estos parámetros es un carácter intrínseco del suelo que corresponde a una componente de la infiltración hidráulica vertical. Están conseguidos a partir de los once datos contenidos en el fichero informático del mapa de suelos, tres de los cuales (textura superficial, presencia de un piso impermeable y espesor del suelo) están conocidos o medidos y provienen directamente de los datos de base ; un parámetro (reserva útil de agua), es calculado a partir de estos datos ; los dos más (permeabilidad del perfil, velocidad de perforación), están interpretados a partir del conocimiento regional de los suelos y obtenidos por combinación de los datos de base. Dichos datos están determinados y la suma de su valor conduce a definir las siete clases de sensibilidad. Esta clasificación de los suelos se debe modular según el contexto geográfico, geológico y climático. Tal sistema de tematización fue probado y validado sobre varias cortaduras existentes del mapa de los suelos. El ejemplo presentado esta sacado de la hoja de Sancerre (Cher). Hoy en día, doce hojas del mapa de los suelos van acompañadas de su mapa temático "sensibilidad a la infiltración", editado a escala de 1/100.000.

Palabras claves

Cartografía - Pedología - Modelización - Hidrodinamismo - Región Centro y departamento de Vienne.

La préservation du patrimoine qu'est le sol ainsi que la protection de l'environnement sont devenues ces dernières années une priorité nationale. La protection des nappes et des cours d'eau face au recyclage des déchets urbains, à l'épandage des boues de station d'épuration et des effluents d'élevage, aux apports des engrais et des pesticides, rend nécessaire l'analyse du pouvoir épurateur des sols. Cette problématique nouvelle a été à l'origine de l'élaboration de la carte de "sensibilité des sols à l'infiltration", document qui contribue à l'évaluation de cette fonction épuratrice.

Les problèmes posés par la protection des nappes sont à l'origine de nombreux travaux destinés à étudier le lessivage de l'azote (Burns, 1976), estimer les reliquats azotés (Malot-Duboin, 1980 ; ITCF, 1985 ; Laurent et Castillon, 1987), analyser les transferts hydriques dans le sol (Morlet, 1990), afin de classer les milieux en fonction des risques de lessivage (Sébilotte et Meynard, 1990 ; Delouée, 1988) et de la sensibilité du milieu à l'infiltration (Edeline, 1989, 1990). Des applications thématiques, issues de cartes pédologiques, ont été développées sur ce sujet dans plusieurs régions : carte d'aptitude des sols à l'assainissement individuel en Gironde (Rassineux et Chossat, 1982), carte de sensibilité des sols au lessivage dans l'Aisne (Solau et al., 1994 ; Fouillard et al., 1987), carte de sensibilité hydrologique en Ille et Vilaine (Dupont, 1994), carte d'aptitude à l'assainissement individuel dans le Bas-Rhône (Cadillon, 1994).

Contrairement aux travaux antérieurs, les données de base de la carte des sols de la région Centre et du département de la Vienne informatisées dès 1980, permettent de répondre rapidement à un problème posé. L'ensemble des cartes de sols déjà éditées sont d'ailleurs systématiquement accompagnées de quatre cartes thématiques (texture superficielle, contraintes liées à l'excès d'eau, réserves utiles potentielles, aptitudes agricoles des sols). Plus récemment, toujours avec le souci d'accroître les applications de la carte des sols, la thématisation a porté sur des sujets tels que "l'aptitude des sols à l'irrigation" (Boutin et Froger, 1988), et "les contraintes pédologiques à la mise en valeur forestière" (Boutin et al., 1990).

Avec un objectif général comparable, un groupe de travail interdépartemental a proposé une méthode d'élaboration d'une

"carte de sensibilité des sols à l'infiltration". Le but de cette nouvelle carte thématique est de représenter spatialement le comportement hydrodynamique des sols des régions cartographiées (Centre et Poitou-Charentes). Cette approche se fonde sur l'analyse du fonctionnement hydrique global des sols et sur la modélisation de la circulation verticale de l'eau au sein de chaque unité cartographique.

L'objectif de cet article est de mieux faire connaître cette démarche et son originalité. Nous résumerons en premier lieu, la méthodologie de la carte des sols de la région Centre et du département de la Vienne. Ceci nous permettra de présenter les règles de pédotransfert utilisées pour réaliser la carte de la sensibilité des sols à l'infiltration. Nous discuterons ensuite des limites et de la validité du modèle proposé, que nous illustrerons à partir d'un exemple régional.

LA CARTE DES SOLS DE LA RÉGION CENTRE ET DU DÉPARTEMENT DE LA VIENNE : une banque de données informatisées

Une méthode novatrice de cartographie

Les Chambres d'Agriculture du Cher, de l'Indre, de l'Indre et Loire et de la Vienne, ont entrepris au cours des années 1970, à l'initiative de R. Studer, la réalisation d'une cartographie systématique des sols à l'échelle du 1/50.000°. Ces documents sont élaborés selon une méthodologie et une légende communes (Studer et al., 1982). Ce programme compte aujourd'hui quarante cinq feuilles éditées, couvrant plus de deux millions cinq cent mille hectares. Le Loir et Cher et la Haute Vienne se sont également associés, plus ponctuellement, à ce programme.

Une légende homogène

Chaque unité cartographique comporte une seule unité typologique de sols (unité simple). Chaque unité typologique est caractérisée par les cinq attributs suivants :

- développement du profil : la légende établie en 1982 (Studer et al., 1982) fait référence aux sous-groupes de la classification Française (CPCS, 1967) ; et récemment au référentiel pédologique (AFES-INRA, 1992, 1995).

- texture de surface : elle est caractérisée à partir du triangle de texture de "l'Aisne" (Jamagne, 1967).

- intensité de la saturation en eau (hydromorphie, drainage naturel) : le classement fait référence aux classes de drainage définies par Jamagne (1967).

- charge caillouteuse : différents symboles, empruntés à la schématisation lithologique habituelle des géologues, indiquent la présence d'une quantité importante d'éléments grossiers.

- nature et profondeur d'apparition du substrat ou de la roche mère : cette rubrique indique la nature lithologique et le faciès de ces matériaux (horizon C ou R), la nature de l'altération éventuelle du substrat, la texture des horizons C ou M, ainsi que leur profondeur d'apparition respective.

Une saisie informatique des données

Le processus d'édition automatique de ces cartes comporte la création pour chaque feuille, d'une base de données informatisées. Dans la première étape, les coordonnées géographiques des plages cartographiques sont enregistrées pour chaque unité cartographique de sol, aboutissant au fichier géométrique. Dans la seconde étape, les cinq attributs de chaque unité typologique sont codés ce qui permet la création du fichier sémantique qui comporte en fait onze rubriques ; les différentes variables de l'attribut "substrat" étant décomposées en six données sémantiques.

Une informatisation pour des applications pratiques : les cartes thématiques

L'informatisation des données de la carte des sols à 1/50.000 permet d'effectuer des opérations de consultation, extraction, tri ou calcul pour acquérir de nouvelles données. Quatre cartes thématiques à 1/100.000 ont été réalisées à partir de ces données informatisées (Studer et al., 1982) pour répondre aux objectifs initiaux de la carte des sols.

Les cartes des textures superficielles et des contraintes liées à l'excès d'eau correspondent à une simple extraction et réutilisation d'une donnée sémantique croisée avec le fichier géométrique.

Les cartes des réserves utiles potentielles et celle des aptitudes agricoles correspondent à la combinaison de plusieurs attributs des unités typologiques croisée avec le fichier géométrique : La réserve utile potentielle est calculée sur un mètre de profondeur (Jamagne et al., 1977 ; Studer et Lafrechoux, 1980). L'aptitude agricole est calculée à partir de sept paramètres cotés et classés selon leur incidence sur le potentiel du sol (Begon et al., 1978 ; Studer, 1977, 1979). Les données (réserve utile, aptitude agricole) résultant de ces deux dernières cartes sont incluses dans le fichier sémantique de la carte des sols.

LA CARTE DE LA SENSIBILITÉ DES SOLS A L'INFILTRATION : UNE APPROCHE DE LA RELATION SOL - EAU

Une valorisation de la carte des sols dans une optique environnementale

La préoccupation croissante de la gestion durable de l'espace rural par une conduite raisonnée des activités agricoles, amène à utiliser la base de données de la carte des sols à 1/50.000 pour spatialiser la sensibilité des sols aux risques de dégradation et pollution, en appréciant l'intensité, les possibilités et la rapidité potentielle de l'infiltration. Cela revient à évaluer les risques de "lessivage" des éléments solubles (lixiviation) par type de sol, puisque l'eau transporte au travers du sol, en solution, des substances susceptibles de revêtir un caractère polluant.

La méthode consiste à prendre en compte les processus élémentaires de l'infiltration verticale à partir des caractères intrinsèques du sol et du substrat. Les critères utilisés, issus de la carte des sols, ont été définis à partir des observations in situ et du diagnostic établi d'après environ 3000 profils décrits et analysés.

Les hypothèses de fonctionnement hydrique retenues sont issues également de la connaissance régionale du milieu acquise grâce aux études préalables au drainage menées sur près de 100000 hectares (Studer et al., 1981), aux secteurs de référence drainage (Favrot, 1987), à la mise en place et au suivi de réseaux expérimentaux "drainage", (Dupont et al., 1991) et aux typologies de sols (Moulin et al., 1992 ; Froger et al., 1994).

L'outil informatique a permis de croiser les données, d'établir des règles de combinaison et de pondérer les paramètres selon leur incidence sur l'infiltration. Pour cela, il a fallu mettre au point un algorithme qui dans un premier temps a été testé sur quatre coupures de la carte des sols à 1/50.000 correspondant à des contextes géopédologiques contrastés, et représentatifs de l'ensemble des zones actuellement cartographiées : feuilles de Mirebeau et Sancerre (contact Jurassique - Crétacé en Poitou et Berry), feuille de Chateauroux (calcaire jurassique fissuré et cryoturbé de Champagne Berrichonne), feuille de Bléré (contact, calcaire lacustre - Sénonien siliceux et leurs couvertures limoneuses de Touraine).

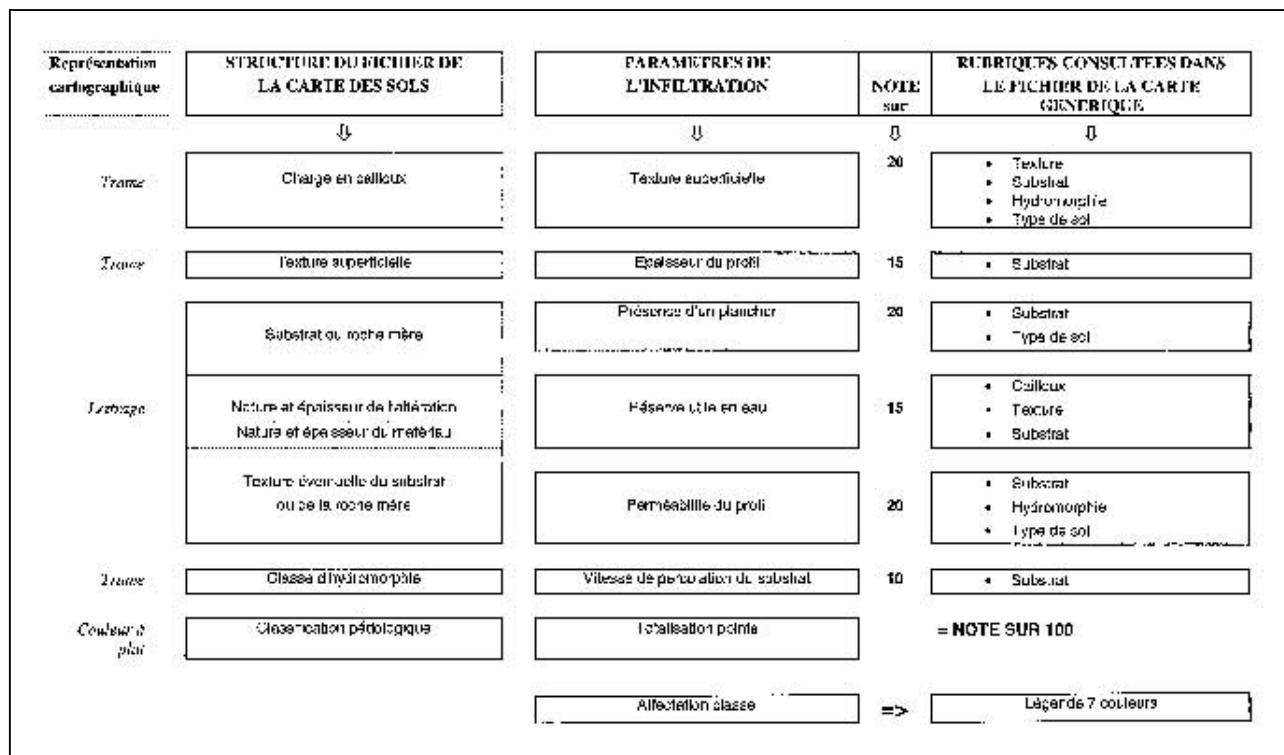
Un algorithme de validité régionale

L'algorithme retenu effectue successivement trois opérations principales (figure 1) :

- 1) il explore et extrait les rubriques du fichier sémantique caractérisant les unités typologiques, puis combine ces

Figure 1 - Modèle de fonctionnement de l'algorithme Principe de la thématisation : exploration du fichier des données de base, définition et quantification des composantes de l'infiltration

Figure 1 - Functioning model of the algorithm thematization principle : prospecting into the card-index file of the source data, definition and numbering of the components of the infiltration .



données pour établir les composantes de l'infiltration verticale de chaque unité ;

- 2) il quantifie et pondère chacun de ces paramètres auquel il affecte une note, puis totalise leurs valeurs et affecte une note globale sur 100 points pour chaque unité typologique ; plus la note est élevée, plus la sensibilité à l'infiltration est forte ;

- 3) selon la note, il affecte enfin chaque unité typologique à l'une des sept classes de sensibilité qui ont été définies ; chaque classe correspond à un cartouche d'une légende couleur dans le fichier géométrique.

Ce dispositif permet la prise en compte des particularités pédologiques régionales.

L'organisation générale des différents paramètres

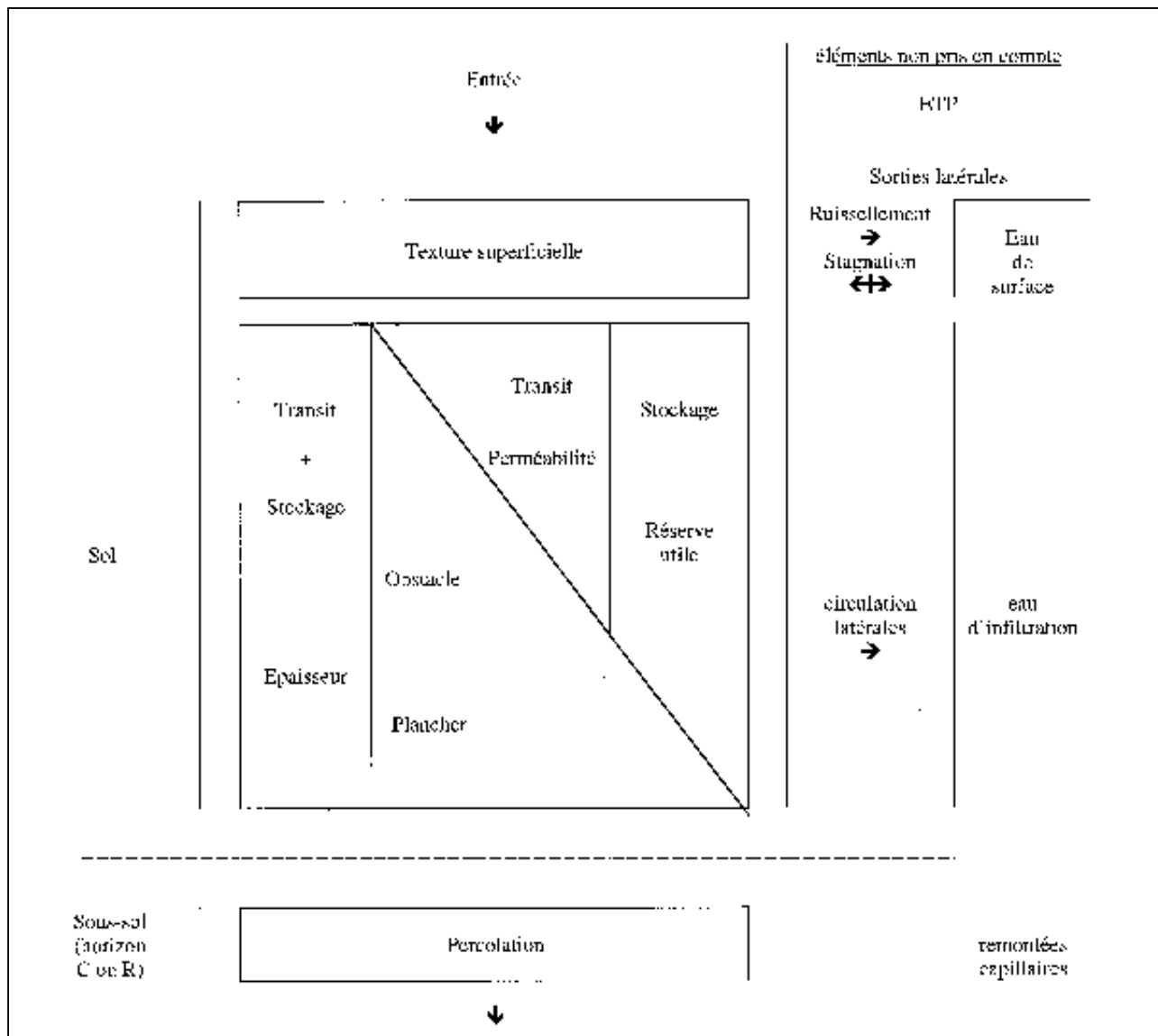
Six paramètres ont été retenus, chacun estimant une composante de l'infiltration verticale. Le schéma de principe (figure 2) propose une représentation imagée du processus de modélisation. Les différents volumes correspondent aux six

paramètres ; ils s'inscrivent dans un cadre rectangulaire par analogie avec une coupe verticale du sol. Ces paramètres sont issus directement ou après traitement des données de la carte des sols. Les paramètres issus directement des données de base sont la texture superficielle, "porte d'entrée" des précipitations dans le sol, la présence ou non d'un plancher imperméable, obstacle à l'infiltration, et l'épaisseur du sol, volume à traverser par l'eau. Le paramètre calculé à partir des données de la carte des sols est la réserve en eau ou contenance du réservoir d'eau potentiellement disponible pour les plantes. Les paramètres interprétés sont la perméabilité du profil ou aptitude au cheminement vertical de l'eau dans le solum et la vitesse de percolation dans le substrat, ou possibilité d'écoulement de l'eau à travers le substrat. Le tableau 1 récapitule la structure de l'algorithme ; il illustre l'utilisation et la combinaison des données disponibles dans le fichier de la carte des sols et leur transfert finalisé sur l'appréciation des processus élémentaires de l'infiltration verticale.

Le choix des coefficients attribués à chaque paramètre (tableau 2) repose sur les principes suivants :

Figure 2 - Schéma de principe.

Figure 2 - Principle scheme : Coloured presentation of the kept parameters to modelize the vertical infiltration.



- 1) le sol a une importance prépondérante par rapport au substrat (vitesse de percolation) ; l'essentiel du mécanisme de lessivage réside dans l'infiltration au sein du profil ; la part du substrat se limite à sa capacité à absorber ou à évacuer cette eau d'infiltration (figure 2) ;

- 2) les paramètres sont hiérarchisés selon leur nature ; il a été accordé une plus grande importance aux paramètres mesurés qu'aux paramètres estimés (tableau 2).

Caractérisation des différents paramètres

Texture superficielle

La texture correspond à la partie supérieure du cadre symbolisant le sol (figure 2). La stabilité structurale et l'aptitude à la fissuration, propriétés intervenant sur le comportement structural du sol, peuvent être appréciées à partir de la texture (Monnier et Stengel, 1982 ; King et al., 1991) mais aussi en fonction de l'état calcique, de l'état organique des horizons et de l'état hydrique du sol. En outre, il est nécessaire de prendre en compte la minéralogie des argiles ainsi que la nature des cations échangeables saturant ou non le complexe. Dans notre

Tableau 1 - Relation entre les données de la carte des sols et les composantes de l'infiltration.

Table 1 - Relation between the data of the soils map and the infiltration components.

Paramètres infiltration Fichier de la carte	Texture de surface	Présence de plancher	Epaisseur du sol	Réserve utile	Perméabilité	Vitesse de percolation
Type de sol	X	X	-	-	X	-
Substrat :						
ζ nature	X	X	X	X	X	X
ζ profond	-	-	X	X	-	-
ζ texture ou altération	-	X	X	X	X	X
Texture superficielle	X	-	-	X	-	-
Hydromorphie	X	X	-	-	X	-
Cailloux	-	-	-	X	X	-

X : Présence de relation

- : Absence de relation

Tableau 2 - Valeur de notation de chaque paramètre de l'infiltration.

Table 2 - Notation value for each parameter of the infiltration.

Texture superficielle	0 à 20	Paramètres mesurés ou calculés 70 % de la note
Présence d'un plancher imperméable	0 à 20	
Epaisseur du sol	0 à 15	
Réserve utile en eau	0 à 15	
Perméabilité du profil	0 à 20	Paramètres estimés 30 % de la note
Vitesse de percolation du substrat	0 à 10	
NOTE TOTALE	100	

schéma, ces valeurs sont fournies par les analyses chimiques et minérales effectuées sur des profils "étalons"; l'estimation de "l'incidence texturale" est présentée par la combinaison :

texture superficielle x développement du profil x nature du substrat x classe de drainage.

Cette combinaison intègre l'ensemble de ces propriétés. La notation du paramètre "texture superficielle" s'échelonne de 2 points (infiltration faible) à 20 points (infiltration forte) (tableau 3).

Les textures sont regroupées en 5 ensembles dont l'échelle de notation résulte des interprétations suivantes : la structure particulière et la faible cohésion des sables les rendent très filtrants. Pour le groupe des sols lessivés-luvisols-à drainage faible à très faible, la texture "sable limoneux" peut entraîner une tendance à la battance et une diminution de la perméabilité superficielle, la note qui leur est affectée est alors diminuée. Il en est de même pour les limon léger, limon moyen, limon moyen sableux, limon sableux, limon léger sableux ; l'état calcique naturel améliore cependant leur stabilité structurale et la note est alors diminuée des sols calcimagnésiques-calcosols-aux sols lessivés- luvisols-. Le coefficient qui est affecté aux

limon argileux, limon argilo-sableux, sable argileux et argile sableuse, bien que plus élevé, varie selon le même principe que pour les limons. L'argile, l'argile limoneuse et l'argile lourde sont plus ou moins perméables selon leur nature minéralogique (exemple : argile gonflante) et leur richesse en ions floculants.

Présence d'un plancher imperméable

Le plancher est considéré en tant qu'obstacle physique s'opposant ou ralentissant l'infiltration dans le mouvement gravitaire de l'eau. Dans son expression la plus contraignante, il correspond à un niveau imperméable dont la macro-porosité est totalement absente. La présence d'un plancher provoque soit un ralentissement de l'infiltration, soit l'installation d'une nappe perchée temporaire. Lorsqu'il est d'origine pédogénétique, le plancher se déduit du développement du profil et de son drainage interne. Lorsqu'il est de nature géologique, il est caractérisé à partir des données sur la texture, l'altération et la nature du substrat qui permettent de définir sa nature et son degré d'imperméabilité.

Tableau 3 - Echelle de notation des textures.

Table 3 - Notation scale of the textures.

Textures	Points
Sable	20
Sable limoneux Limon léger, limon moyen, limon moyen sableux	8 à 20
Limon léger sableux, limon sableux	2 à 10
Sable argileux, argile sableuse, limon sablo-argileux, limon argilo-sableux, limon argileux	10 à 18
Argile, argile limoneuse, argile lourde	5 à 20

La notion de plancher n'est pas exprimée en tant que telle dans la banque de données. L'algorithme extrait ce paramètre en croisant les données du fichier de base par l'application de la combinaison :

développement du profil x classe de drainage interne
x nature du substrat.

La notation du paramètre "plancher" s'échelonne de 5 points (présence de plancher) à 20 points (absence de plancher) (tableau 4). Le coefficient affecté à ce paramètre est important car il s'agit d'un paramètre tangible, observable sur "les profils étalons". Trois classes ont été définies à partir de la combinaison "Incidence du plancher".

Classe 1 - Présence d'un plancher - La présence d'un plancher est considérée dans les trois cas suivants : substrat induré ou imperméable, sol à horizon induré ou imperméable, ou combinaison "type de profil x drainage très faible à pauvre x substrat meuble" ; en effet, certains développements de profils traduisent soit un comportement morphogénétique lié à un plancher soit une forte discontinuité texturale ou structurale (exemples : planosols, pélosols, sols lessivés-luvisols- hydro-morphes).

Classe 2 - Plancher discontinu ou intermittent - Elle est définie

par la combinaison "type de profil x drainage faible à imparfait x substrat meuble" (Exemple : sols à caractères vertiques).

Classe 3 - Absence de plancher - Elle est définie par la combinaison "type de sols x drainage modéré à favorable x substrat meuble" (exemple : sols bruns lessivés - néoluvisols - sains sur substrat filtrant).

Epaisseur du sol

Ce paramètre observable sur le terrain est issu directement de la banque de données. L'épaisseur du sol permet de caractériser le transit plus ou moins rapide d'une solution et le volume d'eau stockée. Elle prend en compte l'ensemble du profil et le substrat lorsque celui-ci est constitué de matériaux meubles. Cette notion d'épaisseur permet de moduler la réserve en eau qui ne tient compte ni des textures à forte rétention en eau, comme les argiles lourdes ou certaines argiles sableuses, ni de la minéralogie des argiles. (Exemple : cas des sols épais, la notation attribuée au paramètre "épaisseur" atténue l'effet de la notation du paramètre "réserve en eau" sur la note totale). La notation s'échelonne de 0 point (sol très épais) à 15 points (sol peu épais) (tableau 5).

Réserve en eau

Ce paramètre calculé est directement extrait de la banque

Tableau 4 - Caractérisation et notation de l'effet plancher.

Table 4 - Characterization and notation of the impermeable level effect.

Classe	Critères de détermination		Points
1	Présence d'un plancher	ζ Substrat induré ou imperméable ζ Sol à horizon induré ou imperméable ζ Sol x drainage faible à très pauvre x substrat meuble	5
2	Plancher discontinu ou intermittent	ζ Sol x drainage faible à imparfait x substrat meuble	10
3	Absence de plancher	ζ Sol x drainage modéré à favorable x substrat meuble	20

de données. La réserve utile (R.U.) correspond au volume potentiellement exploitable par le réseau racinaire. Elle désigne le réservoir du sol et son rôle tampon vis-à-vis de l'infiltration de l'eau. Toutefois le sol n'est pas toujours totalement prospecté par les racines, notamment dans les horizons profonds. C'est le cas des horizons acides et aluminiques par exemple, qui sont pris en compte, dans la carte générique pour la classe des sols podzolisés-podzols-. La minéralogie et l'organisation des argiles n'ont pas été considérées dans le calcul de la réserve en eau, les travaux relatifs à leurs propriétés de rétention en eau (Bruand et al., 1988, Bruand et Zimmer, 1992) étant postérieurs à l'élaboration des critères de la carte générique. La note attribuée à ce paramètre varie de 3 points (réserve utile forte) à 15 points (réserve utile faible) (tableau 6).

Perméabilité du profil

Cette variable correspond au transit de l'eau au sein du solum (figure 2) avec une vitesse de transfert plus ou moins rapide. Son approche s'appuie d'une part sur les mesures du coefficient de perméabilité "K 1 heure" (K1, Henin, 1960) qui ont été réalisés sur des centaines de profils étalons et sur les mesures de conductivité hydraulique ; d'autre part sur le comportement hydrique des sols dont la sensibilité à l'excès d'eau traduit le plus souvent un défaut d'infiltration, en l'absence d'une nappe permanente. Ces mesures et observations permettent de caler et de valider l'extrapolation des valeurs de la perméabilité aux différents milieux géopédologiques régionaux.

Le coefficient de perméabilité K est conditionné par les différentes caractéristiques physico-chimiques des sols telles que la texture, la garniture cationique du complexe absorbant (Mériaux in Hénin, 1960), la porosité (Baver in Hénin, 1976), et par son comportement structural. La perméabilité est estimée indirectement à partir de la combinaison "Incidence de la perméabilité" :

développement du profil x nature du substrat
x classe de drainage interne.

La méthode comprend un premier traitement où les couples "développement du profil x substrat" sont triés. Les sols sont ordonnés de manière décroissante en fonction de leur perméabilité ; les "substrats" sont classés selon la perméabilité des horizons profonds du solum. Ce premier tri sert à créer des ensembles, qui, croisés avec les classes de drainage interne permettent de définir quatre classes de perméabilité. La note du paramètre "perméabilité" varie de 1 point (sol non perméable) à 20 points (sol perméable) (tableau 7).

Les quatre classes de perméabilité qui correspondent à des valeurs seuil du coefficient de perméabilité K1, mesurées sur les horizons pédologiques (à l'exception des horizons C ou R) sont les suivantes :

Sols perméables : Ce sont les solums filtrants à drainage favorable à modéré (Exemple sols bruns calcaires-calcosols-).

Sols assez perméables : Ce sont les solums assez filtrants

Tableau 5 - Notation de l'épaisseur du sol.

Table 5 - Notation of the soil thickness.

Classe	1	2	3	4
Épaisseur	≥ 120 cm	80 à 119 cm	40 à 79 cm	≥ 40 cm
Points	0	5	10	15

Tableau 6 - Notation de la réserve utile.

Table 6 - Notation of the useful available water.

Réserve	≥ 150 mm	100 à 149 mm	50 à 99 mm	< 50 mm
Utile	forte	moyenne	faible	très faible
Points	3	7	11	15

Tableau 7 - Notation de la perméabilité du solum.

Table 7 - Notation of the solum permeability.

Perméabilité non perméable du profil	non perméable	peu perméable	assez perméable	
Points	1	6	12	20

à drainage imparfait (exemple : sols bruns calciques argileux - calcosols -) ou moyennement filtrants à drainage favorable à modéré (Exemple : sols bruns lessivés-néoluvisols).

Sols peu perméables : Ce sont les solums assez filtrants à drainage faible à très faible (exemple : sols bruns calciques marneux, hydromorphes - calcosols rédoxiques) ou moyennement filtrants à drainage imparfait (Exemple : sols bruns lessivés à pseudogley - néoluvisols rédoxiques).

Sols non perméables : Ce sont les solums moyennement filtrants à drainage faible à très faible (Exemple : sols bruns lessivés à pseudogley-néoluvisols rédoxiques) ou non filtrants à drainage imparfait à très faible (Exemple : sols lessivés dégradés-luvisols dégradés).

Vitesse de percolation dans le substrat

Ce paramètre évalue la capacité de la roche sous-jacente (substrat ou roche-mère) à accueillir ou à évacuer l'eau d'infiltration ayant atteint la base du solum. Il se rapporte à la porosité en grand des horizons C ou R (macroporosité, fissuration et fracturation). Il exploite les renseignements contenus dans la banque de données (profondeur d'apparition, nature lithologique et faciès du substrat). L'estimation de cette vitesse de percolation s'appuie sur les observations des fosses pédologiques, sur les mesures du coefficient de perméabilité K1 (Hénin, 1960) et les mesures de conductivité hydraulique, réalisées sur les horizons C ou R des profils étalons et sur les résultats des cases lysimétriques des

régions Centre et Poitou-Charentes. La notation de la vitesse de percolation s'échelonne de 2 points (vitesse lente) à 10 points (vitesse rapide).

Trois classes de vitesse de percolation ont été définies (tableau 8) : la classe 1, vitesse rapide, concerne les roches dures très fissurées ou les formations meubles tels que les sables sédimentaires ; la classe 2, vitesse moyenne, concerne les substrats de "drainance" intermédiaire tels que certaines formations limono-argileuses ou argileuses et la classe 3, vitesse lente, concerne les roches dures non fissurées ou des formations meubles peu filtrantes, le plus souvent argileuses.

Expression cartographique de l'algorithme

La carte de sensibilité des sols à l'infiltration est présentée à l'échelle du 1/100.000°, afin de gommer la variabilité locale du milieu et de lui conférer un caractère synthétique ; les informations concernent le comportement dominant du milieu et non le fonctionnement en un point précis.

Le système de notation, établi sur 100 points, définit 7 classes d'amplitude variable, (tableau 9), dont les couleurs sur la carte permettent une bonne visualisation : les zones où l'infiltration est la plus intense et la plus rapide sont en rouge, alors qu'à l'opposé les zones au sein desquelles l'infiltration est la plus lente et la plus faible apparaissent en bleu.

APPLICATION ET DISCUSSION

Limites et validité du système

Le système de notation utilisé, s'il permet une bonne représentation du fonctionnement hydrique du sol, présente néanmoins des imperfections liées à la grande complexité et à la variabilité spatiale et temporelle des facteurs physico-chimiques de l'infiltration ; ceux-ci ne sont appréhendés ici qu'au travers des informations fournies par la carte des sols ; en outre, chaque unité cartographique est considérée séparément. Il n'implique pas le fonctionnement hydrique global des sols au sein des pédopaysages ; le système (figure 2) ne

considérant qu'une seule arrivée d'eau, les précipitations, et une seule sortie, l'infiltration profonde.

Il n'intègre donc pas la totalité du cycle de l'eau car il néglige les arrivées d'eau externes, les remontées capillaires, et les circulations latérales, lesquelles peuvent entraîner des infiltrations en aval ; inversement, si l'écoulement est nul, il y a stagnation et élimination de l'eau par évaporation ou évapotranspiration.

Tel qu'il vient d'être décrit, le système s'applique essentiellement au sud-ouest du Bassin Parisien, dans les régions Centre et Poitou-Charentes aux conditions de milieu proches. Il concerne l'infiltration en climat océanique et sur terrains sédimentaires (marins ou continentaux).

Il n'est donc pas transposable tel quel aux autres régions françaises dont le climat est différent (exemple : climat méditerranéen) ou dont les matériaux sont d'origine différente, éruptive ou métamorphique (exemple : Marche dans le Berry et le Poitou).

En outre, pour une évaluation complète, il faut aussi tenir compte des autres facteurs qui interviennent dans les modalités de circulation des eaux :

- le modelé du relief, en particulier la pente qui est un des facteurs principaux des circulations latérales et du ruissellement,
 - la géologie : les structures géologiques conditionnent les circulations des eaux souterraines ; elles sont souvent complexes, en particulier dans les systèmes karstiques des régions calcaires.
 - le climat : la quantité d'eau écoulée est notamment déterminée par l'intensité et la répartition des pluies.
 - l'utilisation du sol : les pratiques culturales, les aménagements hydroagricoles (drainage et irrigation), la végétation, par l'évapotranspiration, amplifient ou atténuent les risques.
- L'étude à la parcelle doit replacer celle-ci dans son contexte au niveau du paysage et du bassin versant, pour mieux identifier la nature des risques liés à l'infiltration et préconiser une solution adaptée au problème.

Une application du modèle : la carte de

Tableau 8 - Evaluation de la vitesse de percolation du substrat.

Table 8 - Estimate of the percolation speed of the substratum.

Classe	Vitesse	Nature de substrat	Nombre de points
1	rapide	ζ dur très fissuré ou fracturé ζ meuble, très filtrant	10
2	moyenne	ζ autre qu'en 1 et 3	5
3	lente	ζ dur, peu fissuré ou fracturé ζ meuble, peu filtrant	2

Tableau 9 - Classement des unités cartographiques.

Table 9 - Classification of the cartographic units.

Nombre de points	Classe	Sensibilité à l'infiltration	Couleur sur la carte
< 30	1	très faible	bleu
30 - 44	2	faible	vert foncé
45 - 59	3	moyenne	vert clair
60 - 69	4	assez forte	jaune
70 - 79	5	forte	orangé
> 79	6	très forte	rouge
Non affecté	7	indéterminée	blanc

Sancerre

L'intérêt de la connaissance de la sensibilité du milieu à l'infiltration est présenté à partir de l'analyse du comportement hydrodynamique de six types de sols fortement différenciés, développés sur des formations géologiques typées de la feuille de Sancerre (figure 3).

Présentation du milieu

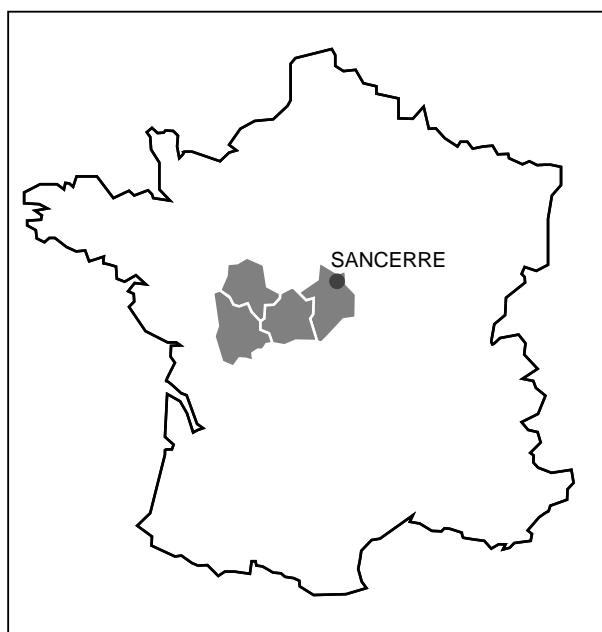
La feuille de Sancerre, située sur la bordure méridionale du Bassin Parisien, couvre les auréoles sédimentaires du Jurassique et du Crétacé, qui ont modelé un relief de côtes. La cuesta permet de différencier deux régions naturelles, la Champagne Berrichonne au Sud et le Pays Fort au Nord. Un extrait de la carte des sols de Sancerre à 1/50.000, reproduite à 1/100.000 (figure 4) illustre la répartition des sols de ces deux régions.

Au sud, la Champagne Berrichonne, sur assises jurassiques calcaires, présente une succession de coteaux, occupés par le vignoble, et de plateaux calcaires aux champs ouverts, ponctués d'interfluves dont les sommets sont recouverts de limons. La base de la cuesta, au contact des plateaux, présente des sols bruns calcaires - calcosols - argileux, assez profonds, à hydromorphie variable sur calcaire marneux kimméridgien (unité 2). Sur les plateaux s'étendent des rendzines - rendosols - et des sols bruns calcaires - calcosols - peu profonds, argileux, sains sur calcaire oxfordien (unité 1). Sur les buttes, des sols bruns lessivés - néoluvisols - limono-argileux, profonds, d'hydromorphie moyenne, sur calcaire oxfordien (unité 3) bordent des sols lessivés -luvisols- limoneux, profonds et hydromorphes (unité 4).

Au Nord, le Pays Fort, sur Crétacé, correspond au revers et au front de la cuesta. Sur le revers de la cuesta, le bocage alterne avec les forêts ; les pentes sont faibles et portent des sols lessivés hydromorphes - luvisols rédoxiques - limoneux, assez profonds, hydromorphes, sur argile à silex éocène ; ces plateaux sont incisés par des vallons aux sols argileux

Figure 3 - Aire de validation de la carte de sensibilité des sols à l'infiltration ; localisation de la feuille de Sancerre.

Figure 3 - Validity surface of the map of the soils sensitivity to infiltration and location of the Sancerre sheet.



engorgés par une nappe permanente (unité 6). Le front de la cuesta, au paysage bocager, est constitué par les diverses formations de l'Albien et du Cénomaniens ; les pentes sont fortes et présentent des sols brun acides moyennement hydromorphes, -alocrisols rédoxiques - sableux et profonds (unité 5).

Analyse de la sensibilité des sols à l'infiltration

Le tableau 10 précise la méthode de calcul de la sensibilité

des sols à l'infiltration. Les modalités de calcul de l'algorithme sont décomposées ; la nature et le poids de chaque paramètre sont indiqués, ce qui permet de dégager les facteurs prédominants de l'infiltration pour chaque type de sol.

En Champagne Berrichonne

Dans les sols de l'unité 1, peu profonds, très perméables sur calcaire fissuré, l'infiltration est rapide et alimente la nappe phréatique. Dans les sols de l'unité 2, assez profonds, peu perméables, sur calcaire massif et non fissuré, l'infiltration est moyenne ; le ressuyage est lent ; une partie des eaux est évacuée par circulation latérale et s'infiltre en contrebas vers les vallons hydromorphes des sols de l'unité 1. Dans les sols de l'unité 3, profonds, peu perméables, sur calcaire fissuré, l'infiltration est lente et se traduit par un ressuyage lent ; situés sur pente, les circulations latérales et le ruissellement sont importants et les eaux s'infiltrent dans les sols de l'unité 1. Dans les sols de l'unité 4, battants, profonds, non perméables, sur substrat peu filtrant, l'infiltration est très faible, les eaux stagnent en surface et engorgent le sol.

L'extrait de la carte de la sensibilité des sols à l'infiltration (figure 4 - Planche couleurs) montre que les sols de sensibilité forte à très forte prédominent en Champagne Berrichonne ; elle présente un modelé karstique, la nappe phréatique alimentée par les eaux d'infiltration est vulnérable ; les risques sont majeurs et sont amplifiés par les transferts latéraux (circulation latérale et ruissellement) issus des coteaux et des buttes. Par contre, les risques sont moindres sur les limons recouvrant les calcaires.

En Pays Fort

Le contact entre les argiles à silex et les sables est souligné par des lignes de sources. Les ruisseaux, qui s'organisent dans les sables, sont alimentés par ces sources, par la nappe albo-cénomaniennne et par le ruissellement des eaux issu du revers de la cuesta, aux sols peu perméables. Dans les sols de l'unité 5, assez perméables sur sables filtrants, l'infiltration est assez rapide et recharge la nappe phréatique. Les sols de l'unité 6, engorgés par la nappe et les arrivées d'eau, sont situés dans des zones très sensibles aux risques de pollution.

L'extrait de la carte de la sensibilité des sols à l'infiltration (figure 4) montre que le Pays Fort apparaît comme une région à moindres risques. Sur le revers de la cuesta dominant des sols de sensibilité faible à très faible ; le défaut d'infiltration et de circulation latérale entraîne la stagnation de l'eau. Sur le front de la cuesta, la sensibilité des sols est assez forte et les risques sont importants ; ils sont accrus par la concentration des eaux dans les talwegs où la nappe est permanente.

Commentaires

L'ensemble de la Champagne Berrichonne sur substrat jurassique a été classé "en zone vulnérable" (Directive Nitrates), malgré des zones à moindres risques révélées par la carte thématique ; le Pays Fort sur substrat crétacé n'est pas classé en "zone vulnérable" (Directive Nitrates) malgré certaines zones à risques bien localisées sur la carte thématique.

Évolution prévue de la démarche

La carte de sensibilité des sols à l'infiltration est un document de référence pour entreprendre des investigations

Tableau 10 - Calcul de la sensibilité à l'infiltration pour les 6 sols types (feuille de Sancerre).

Table 10 - Calculation of the sensitivity to infiltration for the six type soils (Sancerre sheet).

Paramètre Sol Représentation phique	Texture	Plancher impermeable	Epaisseur (cm)	RU (mm)	Perméabilité	Vitesse percolation	Total	Classe	cartogr
1 notation	A 20	absent 20	< 40 15	50-100 11	perméable 20	rapide 10	96	6	rouge
2 notation	A 20	moyen 10	40-80 10	100-150 7	peu perm. 6	moyen 5	58	3	vert
3 notation	LAS 10	moyen 10	< 120 0	< 150 3	peu perm. 6	rapide 10	39	2	bleu vert
4 notation	Lms 2	présent 5	< 120 0	< 150 3	peu perm. 1	lent 2	13	1	bleu
5 notation	SI 20	moyen 10	< 120 0	50-100 11	assez perm. 12	rapide 10	63	4	jaune

complémentaires sur les circulations latérales, sur l'identification des flux et des transferts hydriques, notamment dans le cas des modelés karstiques dans les régions calcaires. La poursuite de ce travail prévoit d'étudier les flux latéraux et les transferts vers les zones de concentration des eaux.

Dans un premier temps, il est prévu de réaliser une carte d'accompagnement ; cette carte précisera les zones sensibles recevant les eaux amont, les zones de pente à l'origine des circulations latérales et les zones critiques situées dans les talwegs ou en aval des versants, sièges de concentration dont les manifestations les plus flagrantes sont les encroûtements calcaires et les accumulations de fer.

A l'avenir, le croisement des données spatialisées (Jamagne et al., 1993) par l'intermédiaire de S.I.G. (Système d'Information Géographique), de M.N.T. (Modèle Numérique de Terrain), et des différents paramètres du milieu (climat, occupation du sol...) vont permettre d'améliorer la modélisation de la sensibilité des sols à l'infiltration.

CONCLUSION

La carte de sensibilité des sols à l'infiltration est destinée à informer sur l'incidence de la couverture pédologique, sur la qualité des eaux des nappes superficielles en relation avec les risques de lessivage d'éléments indésirables. Elle apporte des indications sur le comportement du sol et sur les circulations de l'eau. Elle permet de visualiser des secteurs plus ou moins sensibles.

Bien que cette carte soit fondée sur une approche qualitative, sa pertinence a pu être justifiée lors de son utilisation (Martin, 1995) dans le cadre du diagnostic préalable à l'élaboration de programmes d'action dans les "zones vulnérables" (Directive Nitrates) en Indre et Loire, ainsi qu'à l'occasion d'études menées lors de la mise en place des périmètres de protection de captage (Rassineux, 1994), et des opérations labellisées "FERTIMIEUX" (Ourzik, 1993 ; Lafrechoux, 1994, Dupont et al., 1995). Elle est cependant destinée à évoluer grâce à la poursuite d'expérimentations qui vont permettre de mieux caractériser les critères de diagnostic.

La préservation des éléments physiques interdépendants tels que le sol, l'air et l'eau, est devenue ces dernières années une priorité. Devant l'importance de l'enjeu, les actions à mener en matière de protection font progressivement l'objet d'un encadrement réglementaire, ce qui leur confère un statut d'obligations, les échéances d'application étant planifiées dans le temps. De nombreuses actions sont déjà mises en œuvre, destinées à la protection de l'eau (eaux souterraines et superficielles) et de l'environnement, et relevant respectivement de la loi du 3 Janvier 1992 (loi sur l'Eau) et de la loi du 19 Juillet 1976 (Installations Classées). Elles s'appliquent en particulier pour les opérations de recyclage des déchets urbains, d'épan-

dage de boues de station d'épuration, d'épandage d'effluents d'élevage, d'engrais minéraux et d'utilisation des produits phytosanitaires. Cette carte contribue aux modalités d'applications réglementaires liées au traitement et à la limitation des pollutions des nappes et des cours d'eau, en particulier en précisant des ensembles géomorphologiques microrégionaux, en discordance parfois avec les limites des régions naturelles administratives. Cette carte thématique permet de délimiter et d'évaluer les zones à risques dont la distribution est souvent complexe, en évitant des zonages administratifs inadéquats des applications réglementaires trop uniformisées.

REMERCIEMENTS

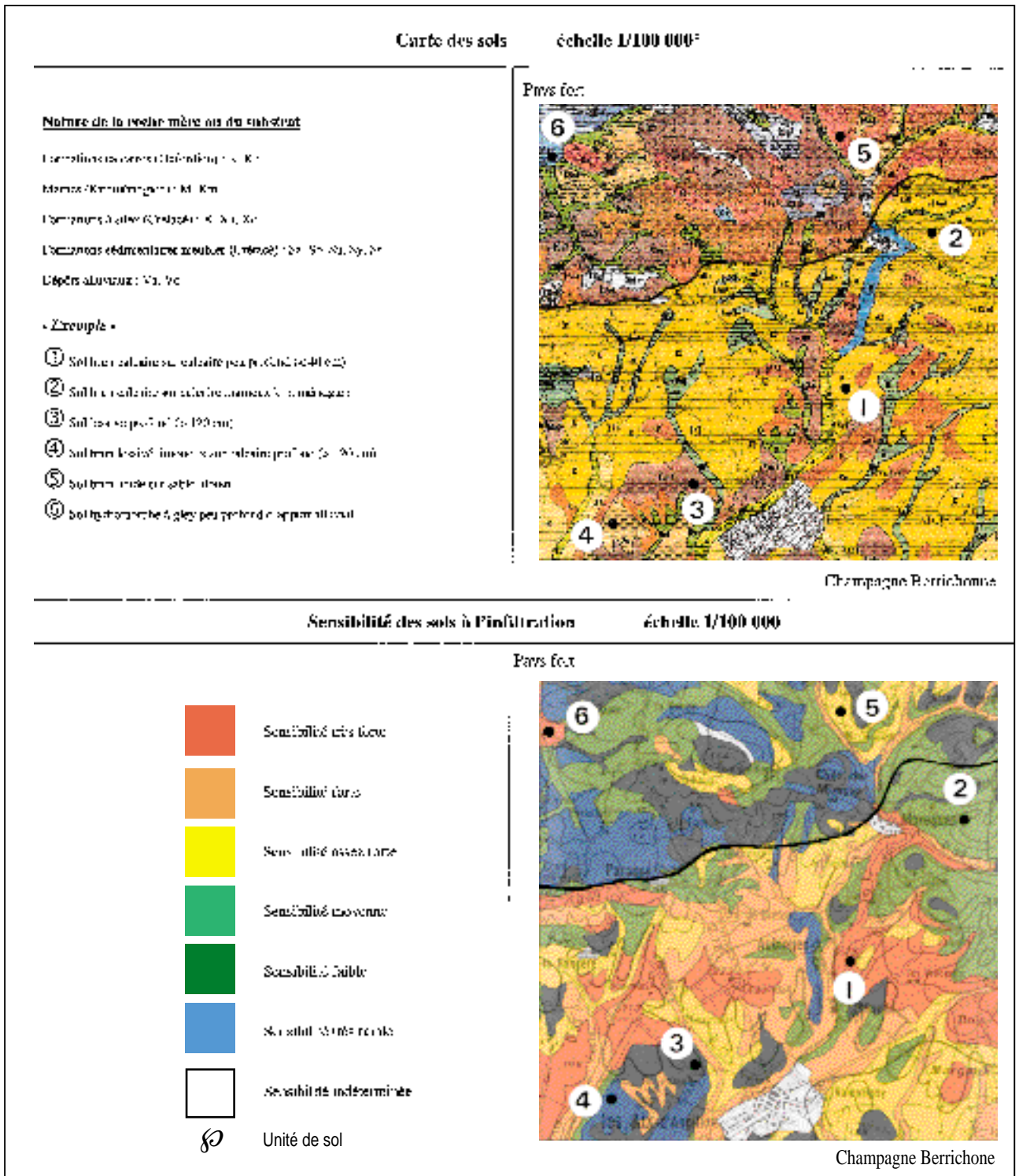
Les auteurs remercient particulièrement J. Ducloux, M. Isambert et J.C. Favrot.

Ils dédient cet article à la mémoire de R. Studer et J. Blaskiewicz, sans qui "la carte des sols" de la région Centre et du département de la Vienne n'aurait pas vu le jour.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES - INRA - 1992, 1995 - Baize D. et Girard M.C. coord- Référentiel pédologique, principaux sols d'Europe - INRA Paris.
- Begon JC, Mori A., Hardy R., 1978 - Un système de classement des terres suivant leur aptitude à la production agricole- CR Acad. Agric. 1279-1285
- Boutin J.D., Chopineau J.L., Froger D., Thomas A., 1990 - Carte des sols de la région Centre à 1/50.000- Feuille de Langeais - Carte thématique des contraintes pédologiques à la mise en valeur forestière- Chambre d'Agriculture de l'Indre et Loire. 115-118
- Boutin J.D., Froger D., 1988 - Aptitude des sols à l'irrigation - Chambre d'Agriculture de l'Indre et Loire
- Bruand A. Zimmer D., 1992 - Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral entre les sols argileux : incidences sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires-CR. Académie Sciences- Paris-t.315. 223-228
- Bruand A., Tessier D., Baize D., 1988 - Contribution à l'étude des propriétés de rétention des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse-CR- Académie des Sciences-Paris-t.307. 1937-1941
- Burns I.G., 1976 - Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile - J. Agric-Sci. Camb. (86). 305-313
- C.P.C.S., 1967 - Classification des sols -ENSA Grignon - Chaire de Pédologie - fascicule ronéo
- Cadillon M., 1994 - Commentaires sur l'infiltration à partir des études réalisées dans le Sud Est de la France (vitesse d'infiltration, carte d'infiltration, carte de risques de pollution des nappes) - Communication orale
- Delouée R., 1988 - Proposition d'une grille de sensibilité des sols au lessivage - Agence de Bassin Seine Normandie
- Ducloux J., 1993 - Quantification du fonctionnement hydrique de la couverture pédologique - communication orale - Université de Poitiers
- Dupont C., 1994 - Carte de sensibilité hydrologique - Chambre d'Agriculture de

Figure 4 - Extrait de la feuille de Sancerre - Passage des informations brutes de la carte des sols aux données interprétées.
 Figure 4 - Extract of the Sancerre sheet : transition from the direct information given by the soils map to the interpreted data.



l'Ille et Vilaine

- Dupont J., Servant J., Morin J.F., Schmidt J.C.- 1991 - Pratique du drainage en sols argileux : l'expérience du Cher - Et. CEMAGREF, ser. hyd. agr. n°11. 109-129
- Dupont J., Le Gall A., Aillot B., Bonnet G., Goussault C., Caudron F., 1995 - Région Centre : un programme pour limiter le lessivage des nitrates - Perspectives agricoles (n°207-Novembre 1995). 87-97
- Edeline P., 1989 - Etude agropédologique et protection des captages d'eau potable - Chambre d'Agriculture de l'Ille et Vilaine
- Edeline P., 1990 - De la source au captage. L'eau, enjeu de l'agriculture - Agriculture et environnement - Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
- Favrot J.C., 1987 - Etudes et recommandations préalables au drainage : la méthode des secteurs de référence. Enseignements et prolongements de l'opération drainage ONIC - Ministère de l'Agriculture (1980-85). C.R. Acad. Agric. Fr., 73 : 23-32
- Fouillard P., Marin - Lafèche A., Nicoullaud B et Solau J.L., 1987 - Carte de sensibilité des sols au lessivage hivernal de l'azote - Chambre d'Agriculture de l'Aisne, station agronomique de l'Aisne et INRA de Laon
- Froger D., Moulin J., Servant J., 1994 - Les terres de Gâtines, Boischaud Nord, Pays Fort, Touraine, Berry- Chambres d'Agriculture du Cher, de l'Indre, de l'Indre et Loire du Loir et Cher
- Henin S., 1960 - Le profil cultural - Principes de physique du sol - SEIA - Paris
- Henin S., 1976 - Cours de physique du sol - ORSTOM - EDITEST - Bruxelles
- I.T.C.F., 1985 - Etude des reliquats d'azote minéral sortie hiver, dans le Sud-Est (départements 01, 69, 38, 26 et 42) - Perspectives agricoles (n° 115 juin 1987). 48-55
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols - Ann. Agro. vol. 18 - numéro hors série
- Jamagne M., Betremieux R., Begon J.C., Mori A., 1977 - Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve utile des sols - BTI 324-325. 627-641
- Jamagne M., King D., Girard M.C., Hardy Y R., 1993 - Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie - Science du sol - Vol.31 n° 3. 141-169
- King D., Hardy R., Le Bissonais Y. - 1991 - évaluation spatiale de la sensibilité et l'érosion hydrique des terres agricoles de la région Nord-Pas de Calais- SESCOF- INRA Orléans
- Lafrechoux M., 1994 - Opération labellisée fertimieux - Opération Trégonce et Ringoire - Chambre d'Agriculture de l'Indre
- Laurent F., Castillon P., 1987 - Reliquats azotés sortie hiver : détermination du coefficient de lessivage (modèle de Burns) - Perspectives Agricoles (n° 115 juin 1987). 48-55
- Malot - Duboin, 1980 - Reliquat d'azote minéral sur blé - mémoire de fin d'études ISARA - ITCF - "modèle Lorraine" - Perspectives agricoles (n° 115 juin 1987). 48-55
- Martin B., 1995 Les programmes d'actions en zones vulnérables à la pollution agricole par les nitrates - Diagnostic préalable en Indre et Loire - Rapport de stage ENGREF
- Monnier G., Stengel P., 1982 - La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique - BTI n° 370-372. 503-511
- Morlet G., 1990 - Le rôle du sol dans le mécanisme d'enrichissement en nitrates des eaux de percolation-Horizon : Nitrates : comment limiter leur lessivage - FDGEDA de la Marne
- Moulin J., Dupont J., Servant J., - 1992 - Les terres de Champagne Berrichonne- Typologie des sols agricoles et forestiers- Chambres d'Agriculture de l'Indre et du Cher
- Ourzik A., 1993 - Evaluation de la sensibilité à l'infiltration des sols du Nord-Poitou en vue d'obtenir le label Fertimieux - Chambre d'Agriculture de la Vienne
- Rassineux J., 1994 - Sensibilité à l'infiltration des sols du périmètre de captage d'eau potable de Sarzec - Chambre d'Agriculture de la Vienne
- Rassineux J., Chossat J.C., 1982 - Etude de l'aptitude des sols à l'assainissement individuel - CEMAGREF Bordeaux
- Sebillotte M., Meynard J.M., 1990 - Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées - Colloque "Nitrates, Agriculture, Eau" - Paris
- Solau J.L., 1994 - Evaluation de la sensibilité des sols au lessivage hivernal de l'azote d'après Burns- Chambre d'Agriculture de l'Aisne.
- Studer R., Servant, J. Dupont J., Lafrechoux M., Nicoullaud B., 1982 - La carte des sols de la région Centre- Bulletin inf. I.G.N.n°45
- Studer R., 1977 - Détermination des baux ruraux - Notation des sols et de leurs aptitudes culturales- Arr. préf. d'Indre et Loire n°78
- Studer R. et al., 1982 - Obtention des cartes thématiques dérivées de la carte des sols (région Centre) - Note INRA Chateauroux
- Studer R., Blaskiewicz J., Etave S., Servant J., Dupont J., 1981 - Le drainage dans la région Centre - Drainage agricole, Théorie et pratique - Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne. 471-474
- Studer R., Dupont J., Lafrechoux M., Nicoullaud B., Servant J., 1982 - Dans la région Centre, une carte des sols... pour quoi faire ? - La France Agricole n° 1923
- Studer R., Lafrechoux M.- 1980 - Esquisses de caractères hydriques des sols de la région Centre- Chambre Régionale d'Agriculture du Centre
- Studer R., 1979 - Propositions pour une définition agronomique et une approche économique de l'amélioration des potentialités des sols par le drainage- Note INRA Chateauroux
- Cartes des sols à 1/50.000 de la région Centre, du département de la Vienne

