



HAL
open science

Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance

Christian Walter

► **To cite this version:**

Christian Walter. Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Science des sols. Université Henri Poincaré de Nancy, 2002. tel-02056022

HAL Id: tel-02056022

<https://hal.science/tel-02056022>

Submitted on 4 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire présenté devant
l'Université Henri Poincaré de Nancy
pour l'obtention du

Diplôme d'habilitation à diriger des recherches

par Christian Walter

Laboratoire de Science du Sol de
l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR)

*UMR « Sol-Agronomie-Spatialisation »
associant l'ENSAR et l'INRA*

Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance

Mémoire scientifique

présenté le 7 mars 2002, devant le jury composé de :

- L.M. BRESSON, Professeur à l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon, rapporteur
- M. JAUZEIN, Professeur à l'Université de Nancy I, rapporteur
- D. KING, Directeur de Recherches à l'INRA d'Orléans, rapporteur
- A. BRUAND, Professeur à l'Université d'Orléans, examinateur
- C. CHEVERRY, Professeur émérite à l'ENSA de Rennes, examinateur
- F. GUILLOCHEAU, Professeur à l'Université de Rennes 1, examinateur

Mémoire scientifique

Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance

Introduction	3
I. L'ANALYSE SPATIALE DES SOLS : CONCEPTS, ENJEUX, MODELES	5
I.1. L'approche cartographique classique	7
I.2. De nouveaux enjeux pour l'analyse spatiale des sols	9
I.2.1 Evolution des concepts	
I.2.2 Implications pour l'analyse spatiale des sols	
I.2.3 Le développement de méthodes explicites et quantitatives d'analyse spatiale	
I.3. Conclusion : la diversité des modèles spatiaux	15
II. LA DESCRIPTION DE L'ORGANISATION SPATIALE DES SOLS : VALIDER, VALORISER ET DENSIFIER L'INFORMATION SPATIALE	17
II.1. La validation des documents cartographiques existants	19
II.2. Valoriser des sources d'information existantes : la synthèse des analyses de terre réalisées en France et en Bretagne	21
II.2.1 Enseignements méthodologiques	
II.2.2 La description quantitative de structures spatiales régionales	
II.2.3 L'utilisation des bases d'analyses de terre à des fins de surveillance des sols	
II.3. Le renouvellement des techniques de terrain	28
II.3.1 L'introduction de la géophysique dans les études détaillées de sol	
II.3.2 L'utilisation de tests de terrain liés au fonctionnement actuel du sol	
II.3.3 Conclusion	

III. PREDICTION ET MODELISATION SPATIALES	34
III.1. La prédiction spatiale des propriétés du sol	34
III.1.1 Comparaison des estimations déduites de la carte pédologique et du krigeage	
III.1.2 Le krigeage de propriétés du sol par des variogrammes locaux	
III.1.3 L'emploi des processus ponctuels pour étudier des sols contaminés	
III.2. La modélisation de la distribution spatiale des sols	42
III.2.1 Introduction	
III.2.2 La modélisation topographique des sols hydromorphes de fonds de vallée	
III.2.3 Perspectives	
III.3. Prise en compte de la variabilité spatiale des sols dans la modélisation hydrologique	50
III.3.1 Intérêt de la stratification pédologique	
III.3.2 La notion de résolution spatiale pertinente	
III.3.3 Bilan	
III.4. Conclusion	57
IV. PERSPECTIVES : LA NOTION DE QUALITE DES SOLS ET SA SURVEILLANCE A L'ECHELLE D'UNE REGION	59
IV.1. Introduction	59
IV.2. Les questions posées : vers une approche prédictive de l'évolution de la qualité des sols	62
IV.3. Des pistes de recherche actuelles	63
IV.3.1 La définition d'indicateurs physiques et biologiques de qualité des sols	
IV.3.2 La constitution de réseaux de surveillance et de bases de données diachroniques	
IV.3.3 La modélisation spatio-temporelle de propriétés du sol	
V. CONCLUSION GENERALE	73
VI. BIBLIOGRAPHIE	77

Introduction

Les sols varient d'un point de l'espace géographique à l'autre, que ce soit sur le plan de leurs caractéristiques morphologiques, physiques, chimiques ou biologiques. Les conditions de la production agricole, l'impact de celle-ci sur les ressources en eau et en sol s'en trouvent modifiées. Le développement de systèmes de production agricole durables doit ainsi tenir compte de cette diversité des sols.

Dans ce contexte général, mes travaux de recherche se sont essentiellement inscrits dans les programmes du laboratoire mixte ENSA-INRA Sol-Agronomie de Rennes-Quimper, qui a pris la structure d'une UMR intitulée « Sol-Agronomie-Spatialisation ». Au sein de ce laboratoire dont la thématique générale concerne l'impact des agrosystèmes sur les ressources en eau et en sol, je me suis intéressé pour l'essentiel à deux axes de recherche :

- l'analyse spatiale des sols. Celle-ci a pour objet de décrire la variabilité spatiale des sols et d'en comprendre les déterminants. Ce concept recouvre l'ensemble des méthodes et des techniques permettant d'étudier ou de représenter les variations des propriétés des sols dans l'espace géographique. Ma recherche vise à mettre en évidence et à décrire de manière quantifiée la variabilité spatiale des sols en promouvant de nouvelles techniques et méthodes ;
- l'impact du sol sur les transferts d'eau et de polluants. L'objet de la recherche concerne l'intégration de la variabilité spatiale des sols dans les modèles de transfert de l'eau et des polluants au sein des bassins versants.

Ce rapport présente sous forme synthétique mes principaux travaux de recherche en matière d'analyse spatiale de sols. Un premier chapitre détaille l'évolution des concepts et des enjeux en la matière, qui a permis la définition de nouveaux modèles spatiaux. Deux chapitres ultérieurs précisent mes activités de recherche, d'abord dans le domaine de la description et la prédiction de l'organisation des sols, ensuite en matière de modélisation spatiale. Un dernier chapitre plus prospectif introduit mes travaux actuels sur la simulation de processus spatiaux évoluant dans le temps pour mieux appréhender les concepts de qualité et de surveillance des sols.

I. L'ANALYSE SPATIALE DES SOLS : CONCEPTS, ENJEUX, MODELES

Introduction

Si la reconnaissance de la variabilité spatiale des sols apparaît ancienne, Boulaine (1989) cite des extraits de textes anciens indiquant que la diversité des sols a été reconnue dès l'antiquité, son étude scientifique est beaucoup plus récente et date uniquement de la fin du XIX^{ème} siècle, initiée par les précurseurs de la Pédologie, en particulier Dokoutchaiev (1893). Pour décrire la variabilité spatiale des sols d'une région, l'approche développée par ces pionniers a été, dès le départ, de type déterministe, c'est-à-dire reposant sur l'idée que l'on pouvait reconnaître les principaux déterminants de la variabilité spatiale des sols, ce qui permettait de les cartographier à partir d'un nombre limité d'observations directes. Les travaux de Jenny (1941, 1961) ont constitué l'aboutissement momentané de ce type d'approche en proposant une équation des facteurs du sol, qui considère le sol comme la résultante locale d'une fonction mettant en jeu le climat, les organismes, le relief, le matériau parental et le temps. Cette vision a fortement dominé pendant plusieurs décennies et associé de façon étroite l'analyse spatiale des sols à l'étude de la formation des sols.

Pour séduisante qu'elle soit, cette approche s'est toujours heurtée à un certain nombre de difficultés inhérentes à l'étude de la variabilité spatiale des sols, qui sont de plusieurs ordres :

- en premier lieu, **les déterminants des sols sont nombreux, interagissent entre eux et sont susceptibles de varier dans le temps** (Yaalon, 1971 ; Webster, 2000). De plus, **l'activité humaine** (travail du sol, fertilisation, amendement, aménagement, pollution) **se surimpose souvent de façon prédominante** à l'effet des conditions naturelles et est susceptible de modifier profondément les propriétés biologiques, physiques et chimiques des sols. Il s'en suit que le sol est généralement une entité très complexe pour laquelle les pédologues ont reconnu depuis plusieurs décennies (Butler, 1980 ; Baize, 1986 ; Ruellan *et al.*, 1989 ; Baize et Girard, 1995) qu'il ne s'agissait pas d'une entité naturelle bien définie dont on pouvait déduire aisément les caractéristiques à partir de la reconnaissance de quelques propriétés diagnostiques. De très nombreux travaux ont ainsi mis en évidence une variabilité souvent importante de propriétés du sol parmi les échantillons attribués à un même type de sol (Beckett et Webster, 1971 ; Banfield et Bascomp, 1976 ; Wilding et Drees, 1983) ;

- une autre difficulté provient du fait que la démarche expérimentale, si utile dans d'autres sciences de l'environnement pour déduire certaines propriétés de la réaction du système à un facteur expérimental (par exemple, l'usage de traceurs en hydrologie), n'est que rarement applicable à l'analyse spatiale des sols. L'objet considéré est trop grand et les modifications généralement trop lentes pour que ce type d'approche soit appliqué sur des surfaces supérieures à quelques m². Un contre-exemple significatif est la cartographie des vitesses d'érosion déduites de la décroissance des teneurs en Césium 137 dans les sols (Loughran *et al.*, 1987) suite à des apports initiaux liés aux essais ou accidents nucléaires. D'autres techniques permettant de dater des processus ou des matériaux connaissent des développements récents, par exemple l'emploi des éléments cosmogéniques comme ¹⁰Be, ³⁶Cl, ²⁶Al pour étudier l'altération et la production des sols (Heimsath *et al.*, 1997, 1999) ou encore l'utilisation de la palynologie pour reconstituer l'historique de l'occupation des sols et l'âge de dépôts colluvionnaires (Gaudin, Com. Pers.). Néanmoins, ces techniques restent peu usitées et **l'étude de l'analyse spatiale des sols est généralement limitée aux seules approches descriptives** fondées sur des observations directes ponctuelles (fosses, sondages) ou indirectes (états de surface observés par télédétection, géophysique) ;
- enfin, **la densité d'échantillonnage appliquée à l'étude des sols est souvent très faible** même pour des études détaillées (Tab. 1) : en règle générale, la fraction échantillonnée est très inférieure au millionième du volume étudié (Legros, 1996). Notre connaissance du sol est donc très fragmentaire et on conçoit aisément que la description de la variabilité des sols ou la reconnaissance de ses déterminants soit difficile, à moins de disposer d'outils de compréhension ou de spatialisation puissants.

	Analyse structurale (Widiatmaka, 1994)	Cartes pédologiques (Jamagne, 1967)			Synthèse nationale des analyses de terre [20]
		1/10.000	1/25.000	1/100.000	
1 observation tarière pour ...	0.005 à 0.1 ha	1 à 5 ha	5 à 10 ha	20 à 100 ha	20 à 100 ha
1 observation fosse pour ...	0.05 à 0.5 ha	10 à 50 ha	50 à 100 ha	500 à 10.000 ha	-
Volume échantillonné / volume total	1/3.000 à 1/70.0000	1/600.0000 à 1/3.000.000	1/3.000.000 à 1/6.000.000	1/12.000.000 à 1/60.000.000	1/12.000.000 à 1/60.000.000

Tableau 1 : Ordres de grandeur des densités d'échantillonnage de la couverture pédologique pour des études d'analyse spatiale des sols de résolution décroissante.

I.1. L'approche cartographique classique

L'analyse spatiale des sols a reposé pendant plusieurs décennies sur une méthode de cartographie standard, formalisée de façon détaillée par les cartographes américains (Soil Survey Staff, 1951) et adaptée en France par Jamagne (1967 ; 1994). Celle-ci vise à donner une image simplifiée de l'organisation spatiale des sols (Boulaine, 1980 ; Legros, 1996) fondée sur la délimitation dans l'espace de plages cartographiques où le sol est considéré comme homogène (en acceptant un taux standard d'impuretés) et en décrivant le contenu par un profil de sol jugé représentatif et choisi par le cartographe. L'ensemble de cette démarche repose sur un échantillonnage de la couverture pédologique dont la densité est définie en fonction de l'échelle finale du document (Jamagne, 1967 ; Legros, 1996) et suppose de la part du cartographe une compréhension des relations entre la variabilité des propriétés du sol et celle d'autres caractéristiques du milieu plus faciles à appréhender (topographie, végétation, substrat, ...). Le cartographe construit ce modèle « sol-paysage » au fur et à mesure de son levé de terrain en mobilisant, non seulement ses observations directes de terrain, mais également le corpus de connaissances en matière de pédogenèse et son expérience antérieure de terrain (Girard, 1983 ; King, 1986). *In fine*, il établit des lois de distribution des sols dans le paysage qu'il exprime de façon implicite par le tracé des limites des plages cartographiques et hélas plus rarement de façon explicite dans la notice associée à la carte.

Cette approche cartographique présente de ce fait les caractéristiques suivantes : elle est **déterministe**, **propose un découpage discret** de l'espace avec des limites abruptes entre les unités cartographiques, **décrit des propriétés pérennes** du sol et repose sur **un échantillonnage dit « libre »**, *i.e* dont l'emplacement des observations est décidé sur le terrain sans plan d'échantillonnage préétabli.

Cette conception a régi de façon quasi-exclusive les levés cartographiques d'inventaire des sols menés depuis les années 1950 dans le monde, avec des variantes liées à l'utilisation de typologies des sols différentes d'un pays à l'autre (Zinck, 1992). En France, l'inventaire effectué par Bornand (1997) a montré que de l'ordre de 50 % du territoire national avait été levé selon cette démarche générale mais à des échelles très variées allant du 1:5 000^{ème} au 1:25 000^{ème} pour les travaux de cartographie détaillée (secteurs de références, études préalables en vue d'aménagement à l'échelle de la parcelle) et du 1:50 000^{ème} au 1:250 000^{ème} pour les cartographies d'inventaire.

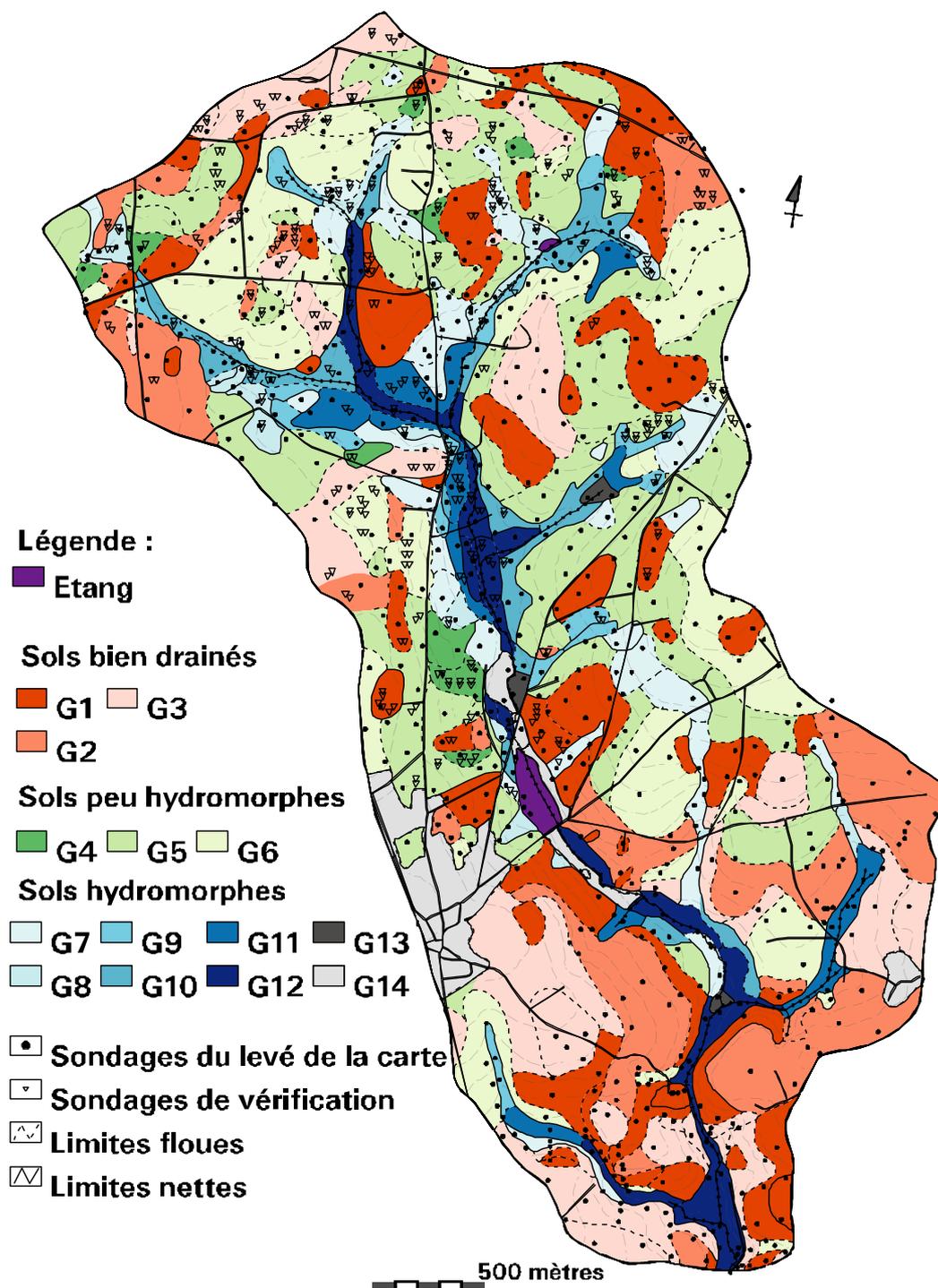


Figure 1 : Extrait du système d'information géographique de la carte pédologique du bassin versant de Naizin représentant les grands groupes d'unités cartographiques de sol regroupés selon un gradient d'hydromorphie croissant (37, 38, 102)

Dans mes activités d'enseignement et de recherche, j'ai moi-même acquis une expérience de terrain conséquente en matière de cartographie des sols réalisée selon cette approche, ayant assuré ou coordonné le levé de quelques 10 000 hectares dans le cadre de programmes de recherche (**11, 12, 40**) ou de levés systématiques des sols de différents secteurs du Massif armoricain (**103 à 112**). A titre d'exemple, la figure 1 représente la carte pédologique du bassin versant de Naizin (Morbihan) d'une superficie de 1 200 hectares levée dans le cadre du programme de recherche CORMORAN : plus de 900 sondages à la tarière ont été implantés selon une démarche d'échantillonnage libre ; les principales caractéristiques morphologiques de chacun des horizons (épaisseur, texture, matière organique, compacité, couleur de la matrice et des taches, pierrosité...) ont été décrites, puis synthétisées en adoptant une typologie (Rivière *et al.*, 1989) permettant de grouper ou de distinguer les observations. Ces types de sol sont ensuite délimités dans le paysage en se fondant sur l'observation paysagère d'autres facteurs (topographie, substrat...). La carte représente *in fine* les sols de ce bassin versant comme une juxtaposition d'unités cartographiques de sol définies à partir d'un nombre limité de critères cartographiques. Au vu de ces critères, le sol est considéré homogène au sein de cette unité sans que l'on puisse, à moins d'un échantillonnage complémentaire, tester la validité de cette hypothèse.

I.2. De nouveaux enjeux pour l'analyse spatiale des sols

I.2.1 Évolution des concepts

L'analyse spatiale des sols s'est longtemps focalisée sur deux types de propriétés : d'une part, des propriétés jugées stables dans le temps, considérées comme intrinsèques des sols (texture, minéralogie, ambiance chimique générale), d'autre part, des propriétés susceptibles d'influencer la croissance des cultures (profondeur du sol, hydromorphie, éléments fertilisants). Ce choix correspondait à une double logique : en premier lieu, seules des propriétés stables dans le temps à l'échelle de la période d'étude considérée semblaient pouvoir faire l'objet d'une analyse spatiale ou valaient la peine d'être considérées ; ensuite, le sol était essentiellement perçu à travers sa fonction de support des cultures – on cherchait à en évaluer « l'aptitude à ... » ou à définir ses niveaux de potentialité (Hénin, 1980 ; Sébillotte, 1989).

Cette conception du sol, vue à travers son aptitude agronomique, est restée dominante au sein de la communauté scientifique de science du sol jusqu'à la fin des années 1980, puis s'est transformée rapidement suite à l'émergence de la problématique environnementale. Le rôle du sol dans les transferts de polluants vers la ressource en eau (rôle du sol dans les

biotransformations de l'azote et le transfert des nitrates au sein des paysages ; rôle de dégradation ou de fixation d'autres polluants potentiels) s'est imposé en premier lieu, puis a été considéré la fonction du sol comme régulateur de flux vers d'autres portions de l'écosystème (air, faune, flore...). L'idée que le sol en lui-même soit une ressource non renouvelable à préserver progresse également, y compris en France où les manifestations de dégradation des sols sont pourtant généralement peu spectaculaires (Cheverry, 1994 ; Robert, 1996 ; Tessier *et al.*, 1996).

Cette vision élargie des sols a conduit au développement d'un nouveau concept qui est celui de « **qualité des sols** ». Une de ses premières définitions est fournie par la Société Américaine de Science du Sol (1995) selon laquelle il s'agit de « la capacité d'un certain type de sol à fonctionner, au sein d'écosystèmes naturels ou aménagés, pour supporter une culture ou une production animale, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et assurer la santé humaine et l'habitat ». Comparée au concept plus ancien de fertilité, une telle définition s'en distingue par l'élargissement des fonctions jugées importantes des sols, non limitées à la seule production agricole. Des auteurs canadiens (Acton et Gregorich, 1995) ont parlé de " santé des sols " pour désigner cette conception renouvelée.

Une telle définition est néanmoins critiquable : Hoosbeek et Bouma (1998) soulignent l'impossibilité de définir une qualité des sols sans préciser l'échelle spatiale à laquelle on se place ; cette définition fait également insuffisamment ressortir l'aspect patrimonial du sol qui a une valeur indépendamment de ses fonctions actuelles, en raison même de son caractère très faiblement renouvelable. Dans tous les cas, elle nécessite la mise au point de critères de qualité qui soient scientifiquement fondés et pouvant faire l'objet d'une surveillance (Sojka et Upchurch, 1999).

I.2.2 Implications pour l'analyse spatiale des sols

Cette évolution très générale de la conception du sol a modifié profondément la finalité et les conditions de l'analyse spatiale des sols.

En premier lieu, les propriétés du sol qui doivent faire l'objet d'une analyse spatiale ne sont souvent plus « choisies » au préalable par le cartographe pour leur facilité d'accès ou leur rôle diagnostique, mais sont **imposées par la demande** d'autres spécialistes désirant les intégrer dans leurs propres modèles de fonctionnement ou de décision ; elles peuvent également dériver de nouvelles réglementations imposant des valeurs-seuils à ne pas dépasser (par exemple, les normes de teneurs-limites de métaux dans les sols).

L'intégration des données-sol dans des systèmes d'information géographique en vue de leur couplage avec d'autres sources d'information (MNT, bases de données...) ou avec des modèles (Burrough *et al.*, 1998) induit également de **fortes contraintes sur le support d'intégration** (une maille carrée plus ou moins grande, la parcelle agricole, le versant, l'unité de sol classique, l'unité administrative). L'information spatiale sur les sols est de ce fait souvent demandée à des niveaux de résolution qui sont inhabituels dans le cadre des cartographies classiques. Ainsi, les développements récents de l'agriculture de précision (Bouma *et al.*, 1999) visant à gérer la variabilité intraparcellaire du milieu supposent des niveaux de résolution très fins (de l'ordre de quelques m²). A l'autre extrême, la demande, particulièrement en matière d'aménagement global, va souvent vers une information rudimentaire sur les sols (les grands types de sol, leurs caractéristiques générales) mais qui couvre l'ensemble d'un territoire.

Enfin, la **dimension temporelle** ne peut plus être négligée, un des enjeux majeurs étant d'évaluer la modification du sol ou de ses paramètres de fonctionnement sous l'effet de l'action humaine : modifications des pratiques agricoles, apports directs ou indirects de polluants, étude de sols très fortement anthropisés comme les sols urbains (De Kimpe et Morel, 2000).

Boiffin et Stengel (2000) résumant ces exigences nouvelles de la façon suivante : « Désormais, la connaissance des sols doit être quantitative et intégrée dans des systèmes complexes d'aide à la décision permettant de simuler les conséquences des diverses actions de production, d'aménagement et d'usage des sols en général ».

I.2.3 Le développement de méthodes explicites et quantitatives d'analyse spatiale

Il apparaît évident à présent que l'approche classique de cartographie des sols précédemment évoquée ne pouvait pas répondre en l'état à ces nouvelles exigences de l'analyse spatiale des sols. De nouvelles méthodes ont dû être développées et, effectivement, l'effort de recherche visant à développer des approches quantitatives de l'analyse spatiale a été considérable au cours des vingt dernières années, de façon générale pour les sciences de l'environnement, mais en particulier en science du sol, ce dernier ayant été souvent pris comme objet d'étude. Il faut bien constater que parallèlement à cet effort de recherche, le levé cartographique « systématique » des sols s'est quasiment arrêté dans la plupart des pays (Zinck, 1992), soit parce qu'il était achevé (Pays-Bas, Belgique), soit plus

généralement parce que son intérêt était jugé trop faible par rapport aux nouveaux enjeux sur le sol.

L'effort de recherche méthodologique précédemment évoqué en matière d'analyse spatiale des sols s'est orienté dans deux grandes voies.

a) L'analyse structurale de la couverture pédologique

La première voie dans laquelle la contribution de chercheurs français a été déterminante peut être considérée comme un *renouveau de la démarche déterministe*. Cette démarche qualifiée « **d'analyse structurale** » (Bocquier, 1973 ; Boulet *et al.*, 1982 ; Boulet *et al.*, 1989 ; Boulet *et al.*, 1995) se fonde sur une entité morphologique qui est l'horizon dont on décrit les caractéristiques et la géométrie détaillée dans l'espace. L'analyse de la géométrie relative des horizons procure des arguments très puissants pour comprendre les processus de formation des sols (Ruellan *et al.*, 1989 ; Curmi, 1993) et en cerner les déterminants. De nombreux travaux, en particulier ceux initiés par P. Curmi à Rennes (Curmi, 1988 ; Curmi *et al.*, 1994, 1998) et auxquels j'ai contribué (**11, 13, 34, 35**), ont permis de tester et de montrer la pertinence d'un modèle d'organisation des sols en horizons, pour évaluer les caractéristiques physiques et hydrodynamiques des sols du Massif armoricain. Des travaux menés dans d'autres contextes français ont également prouvé l'intérêt de cette démarche de stratification en horizons pour prédire les propriétés de rétention en eau (Bruand, 1990) ou les teneurs naturelles en métaux (Baize, 1997). Il faut également souligner l'originalité très grande de la démarche de terrain développée dans ce cadre qui est la seule, à ma connaissance, à adapter complètement l'échantillonnage à la complexité du système pédologique considéré, des changements dans la succession des horizons induisant nécessairement des observations complémentaires permettant d'établir avec précision la géométrie de ces changements.

b) Les approches « statistiques »

La seconde voie a résidé dans le développement considérable des approches statistiques pour décrire les corrélations spatiales des propriétés des sols et en prédire, avec une précision connue, la valeur en des sites non reconnus.

Une première possibilité consiste à appliquer la théorie d'échantillonnage dite classique (Cochran, 1977) à l'étude de la variabilité spatiale des sols : la couverture pédologique est découpée en strates jugées homogènes et on applique au sein de chacune de ces strates un échantillonnage aléatoire permettant d'estimer, de façon non biaisée, des paramètres statistiques de position (moyenne, médiane, mode) ou de dispersion (variance,

interquartile...) des propriétés du sol. Cette approche est qualifiée de « **design based** » par de nombreux auteurs (Cressie, 1991 ; Brus et De Gruijter, 1997) car elle introduit une grandeur aléatoire au niveau de la stratégie d'échantillonnage, le sol étant considéré comme une population infinie. Elle est utilisée de longue date en matière d'expérimentation agronomique (Snédécour et Cochran, 1971 ; Dagnélie, 1981 ; Vauclin, 1982) et peut être aisément couplée à la démarche de cartographie pédologique classique (**14**), qui peut fournir la stratification sur laquelle se fonde l'approche statistique. On dispose ainsi d'un moyen de décrire statistiquement la variabilité spatiale au sein des unités cartographiques par un échantillonnage indépendant de la phase de levé de la carte (Beckett et Webster, 1971 ; Marsman et De Gruijter, 1986).

L'approche géostatistique, initiée par Matheron (1965, 1971), constitue une seconde voie de caractérisation statistique de la variabilité des sols. Elle considère, à l'opposé des visions précédentes, que les variations des propriétés du sol sont continues et aléatoires ; elle est de ce fait qualifiée de « **model based** » (Cressie, 1991). La distribution spatiale d'une variable, supposée être une réalisation d'un processus aléatoire, est ainsi susceptible de présenter une structure s'exprimant par l'existence de corrélations spatiales entre observations. Une étude géostatistique de la variabilité spatiale repose de ce fait sur une première étape d'analyse des corrélations spatiales (par exemple, à travers le variogramme) permettant d'exprimer de manière statistique la continuité de la couverture pédologique. Une seconde étape de prédiction spatiale (le krigeage) permet d'estimer, en tout point ou sur une portion de l'espace géographique, une valeur de la propriété étudiée à partir d'une combinaison des observations voisines et en respectant les corrélations spatiales mises en évidence précédemment. Une erreur d'estimation peut être calculée donnant une idée de la précision des estimations effectuées.

Cette approche géostatistique a été appliquée en science du sol au début des années 1980 (Burgess et Webster, 1980 ; Hajrasulih *et al.*, 1980) et a connu très rapidement un développement considérable trouvant des applications dans tous les domaines de la science du sol : hydrologie des sols (Gascuel-Oudou, 1984), physique du sol (Voltz, 1986), chimie des sols (Goovaerts *et al.*, 1989), biologie des sols (Cannavaciolo, 1998). Bénéficiant d'une recherche méthodologique très importante au niveau international permettant peu à peu d'élargir son champ d'application, la géostatistique est devenue la méthode de référence en matière d'analyse spatiale des sols (Webster et Oliver, 1990).

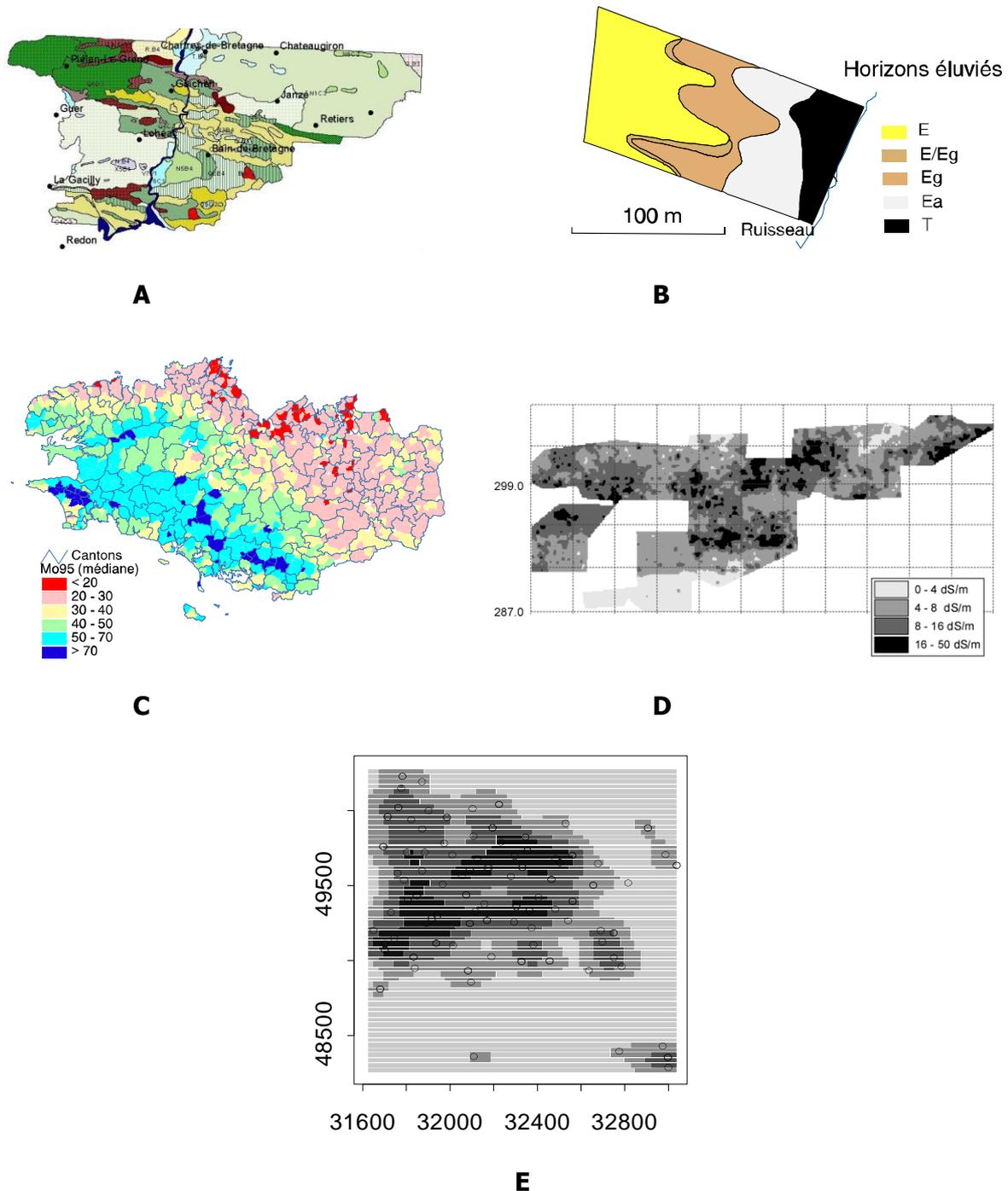


Figure 2 : Exemples de modèles spatiaux permettant de décrire l'organisation spatiale des sols : A. Découpage discret de types de sols pour représenter les principaux sols du sud de l'Ille-et-Vilaine (Forget, 1997 ; **92**) ; B. Découpage discret en horizons de l'organisation spatiale le long d'un versant (Chaplot, 1998) ; C. Découpage discret selon des contours administratifs et représentation d'une mesure statistique d'une propriété du sol (**99**) ; D. Variation continue d'une propriété du sol dans une région (**25**) ; E. Représentation ponctuelle de la localisation des sols pollués et de l'intensité des événements dans un quartier urbain (**26**).

I.3. Conclusion : la diversité des modèles spatiaux

Les recherches méthodologiques de ces vingt dernières années ont contribué à élargir les modèles spatiaux que l'on peut appliquer à l'étude de l'organisation des sols. Ces modèles **peuvent différer dans leur conception du sol** (approche typologique par profil de sol ou par horizon, approche analytique par propriétés), **l'hypothèse sur la forme de variation** (discrète, continue, voire ponctuelle comme dans le cas de contaminations accidentelles) **ou l'aire d'intégration**. Malgré les nombreuses querelles d'école en faveur de l'un ou l'autre modèle (Baize, 1986 ; Boulaine, 1989 ; Ruellan et Dosso, 1993 ; Brus et De Grujter, 1997 ; Webster, 2000), il n'existe pas à mon sens de modèle qui soit intrinsèquement meilleur, chacun d'entre eux devant être appréhendé, au regard d'une finalité, **comme une représentation simplifiée de l'entité réelle qu'est le sol**.

Par contre, selon le milieu considéré, le problème posé, les propriétés du sol en cause ou l'information disponible, l'un ou l'autre de ces modèles peut s'avérer plus pertinent soit parce que plus adapté à l'information disponible, soit parce qu'il décrit mieux la structure spatiale du processus considéré et permet de ce fait des prédictions spatiales plus précises.

La figure 2 illustre différents modèles spatiaux que j'ai considérés au cours des travaux d'analyse spatiale qui seront décrits dans les chapitres ultérieurs : elle montre que j'ai appréhendé le sol selon des approches très différentes, pouvant relever d'une conception purement statistique ou, au contraire, intégrant des considérations déterministes sur l'origine de la variabilité spatiale des sols. De même, selon les cas, la couverture pédologique a été décrite à travers les concepts d'horizon, de type de sol ou plus prosaïquement par un ensemble de propriétés physico-chimiques. J'essayerai de prouver que, si ces différentes approches ne sont pas équivalentes, elles trouvent leur place dans la gamme des outils de l'analyse spatiale des sols par un gain spécifique de connaissance. J'espère pouvoir montrer également que cette diversité des approches n'empêche pas une certaine unité de conception du sol comme une interface au sein de l'écosystème, variable dans l'espace en raison de la diversité de ses déterminants et de durées d'évolution plus ou moins longues, soumise à des contraintes anthropiques susceptibles d'en modifier les caractéristiques et les fonctions, à des échelles de temps beaucoup plus courtes que celles ayant conduit à leur formation initiale.

II. LA DESCRIPTION DE L'ORGANISATION SPATIALE DES SOLS : VALIDER, VALORISER ET DENSIFIER L'INFORMATION SPATIALE

La faible résolution de l'échantillonnage dans l'analyse spatiale des sols est une contrainte majeure qui avait déjà été ressentie de longue date (Soil Survey Staff, 1951 ; Jamagne, 1967). Néanmoins, les premiers travaux mettant en œuvre des approches statistiques sur des propriétés des sols ont montré que la variabilité spatiale des propriétés des sols avait été de façon générale sous-estimée ; ils ont de ce fait jeté un doute sur l'aptitude des méthodes classiques à la décrire. Deux types de résultats apparaissaient particulièrement troublants :

- d'une part, la mise en œuvre des statistiques classiques (de type *design based*) permettant de calculer le nombre d'échantillons nécessaires à l'estimation d'une moyenne avec une précision donnée, conduisait à des valeurs beaucoup plus importantes que les densités d'échantillonnage classiquement pratiquées (Webster et Beckett, 1968 ; Legros, 1978 ; Vauclin, 1982) ;
- d'autre part, les premières applications de la géostatistique aux propriétés des sols révélait des variogrammes expérimentaux présentant des portées très courtes (de l'ordre de la centaine de mètres) avec fréquemment de forts effets-pépité (Mérot *et al.*, 1986). Il semblait donc que l'estimation spatiale de nombreuses propriétés du sol supposait un échantillonnage dense, selon un maillage de l'ordre de quelques dizaines de mètres.

Les structures spatiales ainsi mises en évidence remettaient en cause les approches classiques de description de la variabilité des sols à des échelles moyennes, car leur résolution d'échantillonnage correspondait à des distances au-delà des distances d'autocorrélation déduites des variogrammes. De nombreux travaux ont de ce fait été développés pour analyser ce problème de la description des propriétés des sols sur des surfaces d'intégration plus grandes que la parcelle. Ce chapitre présente ma contribution à ces recherches autour de deux objectifs :

- valider l'information spatiale disponible, en particulier les cartes pédologiques existantes ;
- acquérir une information spatiale plus dense par la valorisation de gisements de données non exploitées jusque là ou par le développement de nouvelles techniques de terrain.

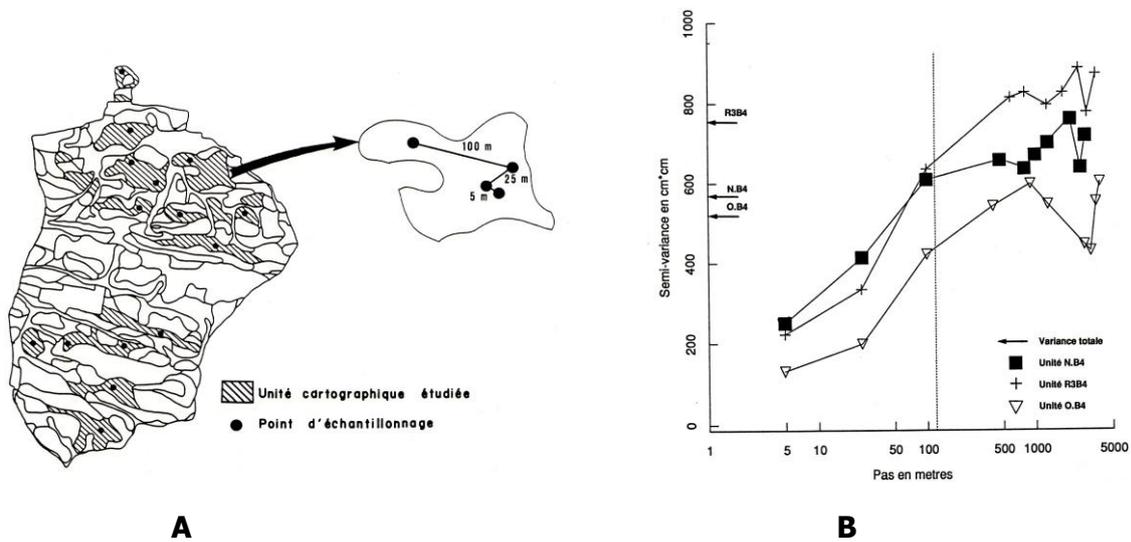


Figure 3 : Caractérisation statistique de la variabilité de propriétés du sol au sein de trois unités cartographiques : (A) Schématisation de la stratégie d'échantillonnage adoptée ; (B) Variogrammes de la profondeur du sol au sein des trois unités cartographiques (1, 22)

II.1. La validation des documents cartographiques existants

Mon travail de thèse portait sur l'estimation de propriétés du sol à moyenne échelle et les possibilités d'associer à une telle estimation une indication de sa fiabilité. Une des voies explorées a consisté à étudier la variabilité intra-unité cartographique des cartes pédologiques existantes.

Les cartes pédologiques levées dans le sud du Massif armoricain ont servi de support à cette étude : ces cartes ont été levées selon les principes classiques déjà énoncés (échantillonnage libre, tracé des limites fondées sur un modèle implicite de relations sol-paysage) présentant *a priori* l'avantage de tenir compte, non seulement des seules observations directes du sol, mais également d'une information paysagère liée aux variations du sol ; par contre, la précision de la délimitation des plages cartographiques ou de la définition des unités cartographiques ne peut être établie sans échantillonnage complémentaire.

Sur un premier secteur de 20 000 ha cartographié au préalable avec une densité d'échantillonnage de l'ordre d'un sondage par hectare, j'ai défini un échantillonnage indépendant de vérification selon une procédure originale (Fig. 3.A) permettant non seulement de quantifier la variabilité globale de propriétés du sol au sein des unités cartographiques, mais également d'avoir des indications sur la structure spatiale sous-jacente à cette variabilité : la stratégie d'échantillonnage proposée permet de façon non biaisée de comparer la variabilité à courte distance (5 ou 25 m) à une variabilité plus progressive (de l'ordre de 100 m) ou encore apparaissant d'une plage cartographique à l'autre. Cet aspect est essentiel et innovant par rapport aux travaux antérieurs, car le seul constat d'une variabilité (par exemple sous la forme d'une étendue de valeurs ou d'une variance) est une information très limitée, qui ne donne aucune indication sur les processus sous-jacents à cette variabilité.

Les résultats obtenus sur ce premier secteur sont de trois ordres :

- la stratification de l'espace proposée par la carte pédologique est efficace dans la mesure où les paramètres de position (moyenne, médiane) des propriétés étudiées (épaisseur, granulométrie, CEC) sont significativement différents entre unités cartographiques et que la variabilité intra-unité est moindre que celle d'ensemble ;

- les structures spatiales diffèrent selon les propriétés et les unités cartographiques considérées : pour les propriétés liées aux constituants des sols (granulométrie, CEC), les variations spatiales se produisent pour l'essentiel d'une plage cartographique à l'autre ; au contraire, les propriétés décrivant la morphologie du sol (types d'horizons, épaisseur) varient sur des distances beaucoup plus courtes de l'ordre de la centaine de mètres. Ces structures spatiales suggèrent des processus spatiaux superposant leurs effets, confirmant les connaissances antérieures sur les principaux déterminants de l'organisation des sols dans le Massif armoricain : rôle du substrat induisant une composante régionale de la variabilité des sols, rôle de la topographie (position dans le bassin versant et dans le versant) et des conditions locales (altération du matériau, occupation des sols) induisant des variabilités à courte et moyenne distance.
- la connaissance de ces structures spatiales permet, en dépassant le simple constat un peu impuissant de l'existence d'une variabilité, de proposer des stratégies d'échantillonnage pour des cartographies ultérieures. J'ai proposé un schéma général de décision tenant compte de l'objectif de précision souhaité et des structures spatiales mises en évidence.

J'ai poursuivi ce travail de validation des documents cartographiques existants dans deux voies :

- j'ai montré, en répétant l'étude initiale dans un secteur éloigné d'une cinquantaine de kilomètres du précédent, que les structures spatiales mises en évidence pour une unité cartographique donnée étaient conservées (**1**), ce qui permet d'envisager leur extrapolation à l'échelle régionale ;
- pour la carte pédologique de Naizin pour laquelle j'ai coordonné le levé, j'ai également montré la possibilité de définir de façon optimale le nombre et la définition sémantique des unités cartographiques en constituant un jeu de validation permettant de tester la variabilité interne des unités cartographiques (**40, 41, 84**). La démarche de validation statistique ne se situe donc pas nécessairement à l'aval de la phase de levé cartographique ; elle peut également être concomitante à celle-ci, ce qui permet d'optimiser certains aspects du découpage de la couverture pédologique en unités cartographiques tout en assurant une estimation non biaisée de la variabilité résiduelle au sein des unités.

II.2. Valoriser des sources d'information existantes : la synthèse des analyses de terre réalisées en France et en Bretagne

Les analyses de terre réalisées en France à la demande des agriculteurs dans des laboratoires agréés utilisant les mêmes protocoles analytiques, constituent une source d'information très importante sur la variabilité spatiale des sols. Cette source d'information n'avait pas été exploitée jusqu'au travail initiateur de Leleux *et al.* (1988) qui à partir d'un recueil des analyses de terre effectuées en Bretagne, montrait la possibilité de quantifier à l'échelle régionale la variabilité intra-communale de propriétés de l'horizon de surface du sol et d'identifier de grandes structures régionales : il révélait en particulier l'existence d'un gradient régulier sud-ouest à nord-est des teneurs en matière organique des sols dans la péninsule bretonne depuis des valeurs très élevées de 7 à 8 % jusqu'à des valeurs inférieures à 2 % dans le bassin de Rennes.

Le travail entrepris en collaboration avec l'ISA de Lille, sous l'égide de l'Association Française pour l'Etude des Sols, a consisté à réaliser la première synthèse nationale des analyses de terre en recueillant l'ensemble des analyses effectuées entre 1990 et 1995 selon des procédures normalisées. Les objectifs scientifiques associés à ces études étaient de plusieurs ordres :

- identifier les structures spatiales régionales des propriétés des horizons de surface et quantifier la variabilité spatiale locale (en caractérisant la variabilité spatiale interne aux unités de stratification) (**2, 19, 20, 24, 43**) ;
- étudier l'évolution temporelle des critères statistiques pour évaluer l'aptitude de l'approche à participer à une surveillance des sol (**17, 99**) ;
- confronter à l'échelle nationale les documents statistiques résultant de l'étude à des documents cartographiques existants, en particulier la carte au 1:1 000 000^{ème} de la France (**50**).

II.2.1 Enseignements méthodologiques

La réponse à ces objectifs scientifiques a supposé la résolution préalable de nombreuses difficultés qu'il me semble utile de rappeler brièvement, car devant être intégrées dans des extensions futures de ce genre d'approche.

Moyenne des écarts-type intra-strates					
	Commune	Canton	PRA	Département	France entière
Argile (‰)	63	74	86	94	105
Limons totaux (‰)	94	107	129	144	186
Sables totaux (‰)	111	126	156	179	215
Carbone organique (‰)	6.3	7.0	8.1	9.0	11.2
C.E.C (cmol+/kg)	5.8	7.5	10.2	11.3	17.2
pH eau	0.6	0.7	0.7	0.8	1.0
P205 Dyer (mg/kg)	189	201	212	215	247
P205 Joret-Hébert (mg/kg)	140	164	192	222	218
Potassium (mg/kg)	119	131	143	162	177
Magnésium (mg/kg)	93	110	145	169	156

Tableau 2 : Analyse statistique de la pertinence de différents découpages administratifs (Commune, Canton, Petite Région Agricole, Département) comme base de stratification à l'échelle nationale de la variabilité de propriétés du sol : comparaison des écarts-types intra-strates à l'écart-type général (24, 43).

a) les problèmes légaux et l'accès aux données

La constitution d'une base nationale d'analyses de terre doit respecter la législation sur les bases de données, ce qui exclut l'identification précise de la parcelle d'origine de l'échantillon ; seule sa localisation par la commune d'origine est admise. Par ailleurs, des problèmes se sont posés quant à la propriété des données analytiques (le demandeur de base, le laboratoire d'analyse, la collectivité) et leur éventuelle valeur stratégique (aire d'influence des laboratoires) ou commerciale (vente de conseil, surveillance). Ces difficultés expliquent le refus de plusieurs laboratoires, dont deux importants, de fournir gracieusement leurs données. Des textes récents (MATE, 1998) semblent résoudre les problèmes juridiques posés, mais laissent entiers les problèmes financiers.

b) l'analyse préalable de l'information

Le recueil de quelques 500 000 analyses et plus de 2 millions de déterminations auprès de 40 laboratoires pose des problèmes informatiques inévitables, mais surtout d'homogénéisation et de tri des données : de nombreux tests et outils de conversion ont dû être développés pour la localisation géographique, la recherche de doublons, le tri des données pertinentes (les horizons de surface de sols cultivés), l'homogénéisation des unités, l'élimination de données aberrantes. L'ensemble de ce travail nous a amené à constituer une base de données intégrant 300 000 analyses sur la période 1990-1995 et portant sur 20 déterminations analytiques différentes renseignées selon une fréquence très variable.

c) le choix d'une base de stratification

Le choix d'une base de stratification est apparu crucial : la localisation des échantillons par leur seule commune d'origine impose soit le recours à des découpages administratifs regroupant les communes (commune, canton, petites régions naturelles, départements), soit à des découpages *a priori* plus intéressants parce que liés aux processus pédologiques (carte géologique, carte pédologique), mais supposant un croisement géométrique avec les contours communaux ce qui induit des erreurs d'allocation (*i.e.* présence de plus d'une unité au sein d'une même commune).

Parmi les découpages administratifs, nous avons montré que le découpage cantonal était le plus intéressant (tab. 2) : il permet de réduire de façon très significative la variance résiduelle intra-strate et il assure un effectif suffisant au sein d'un grand nombre de strates contrairement au découpage communal.

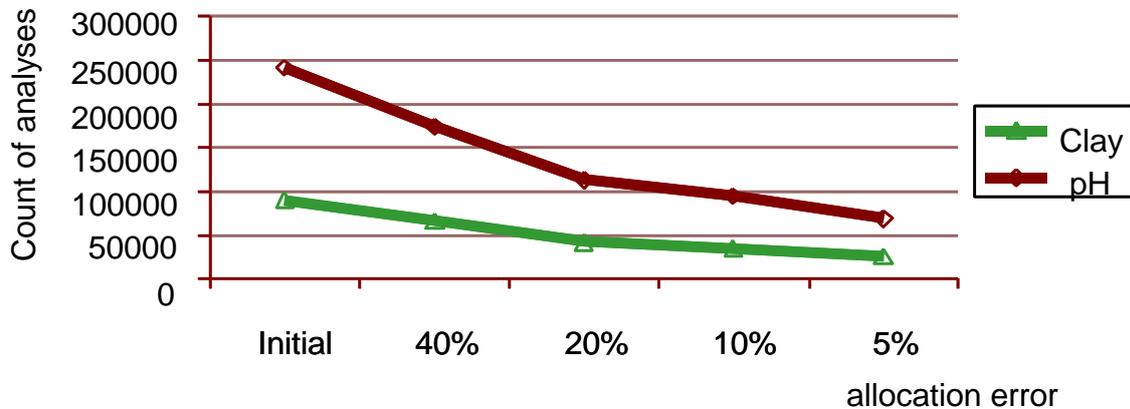


Figure 4 : Evolution du nombre d'analyses de terre susceptibles de renseigner les unités cartographiques de la carte pédologique au 1:1 000 000^{ème} en fonction de l'erreur d'allocation admise : dans le cas d'une erreur d'allocation de 5 %, seules les analyses provenant d'une commune pour laquelle plus de 95 % de sa superficie appartient à une même unité cartographique, sont retenues (50).

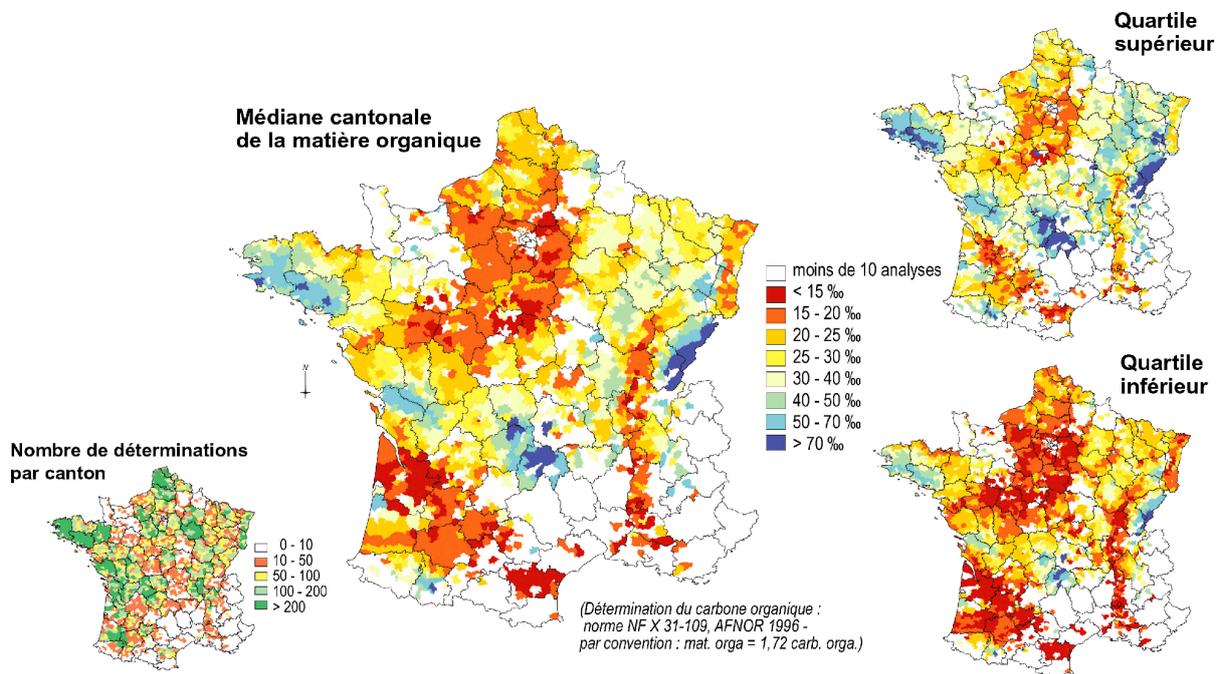


Figure 5 : Statistiques cantonales de la teneur en matière organique des sols cultivés : médiane, quartiles inférieurs et supérieurs, nombre de déterminations (24)

Nous avons également testé le croisement avec la carte pédologique de la France (King *et al.*, 1994) à l'échelle du 1:1 000 000^{ème}; il est clairement apparu que les erreurs d'allocation dues au croisement géométrique étaient très importantes, conduisant à éliminer plus de 60 % des données si l'erreur d'allocation était fixée à un seuil de 10% (Fig. 4). Il y a donc là une perte considérable d'information qui pourrait être aisément réduite par une localisation plus précise des échantillons, facilitée par la généralisation récente des GPS, mais posant des problèmes de confidentialité dans la constitution des bases de données.

II.2.2 La description quantitative de structures spatiales régionales

La synthèse entreprise a permis de mettre en évidence l'existence de structures spatiales de très grande portée de l'ordre de la dizaine à la centaine de kilomètres. Ce résultat est novateur selon deux points de vue :

- certes, l'essentiel des structures spatiales mises en évidence étaient déjà connues en particulier celles concernant les constituants du sol (granulométrie, CEC, état calcique, teneur en calcaire) ; mais elles ont été pour la première fois décrites de façon quantitative sur la base de critères statistiques décrivant les teneurs médianes mais également la dispersion des valeurs (Fig. 5). Il m'apparaît également tout à fait remarquable d'aboutir à l'identification de telles structures spatiales par une simple agrégation d'analyses échantillonnées de façon indépendante, avec des historiques de parcelles vraisemblablement très divers et de plus selon une faible résolution d'échantillonnage (tab. 1). Cela m'incite à penser que la variabilité spatiale des sols à courte distance a été de façon générale surévaluée et que la plupart des études statistiques de la variabilité spatiale des sols se sont limitées à un domaine géographique trop restreint, ce qui empêchait d'identifier les structures régionales de longue portée ;

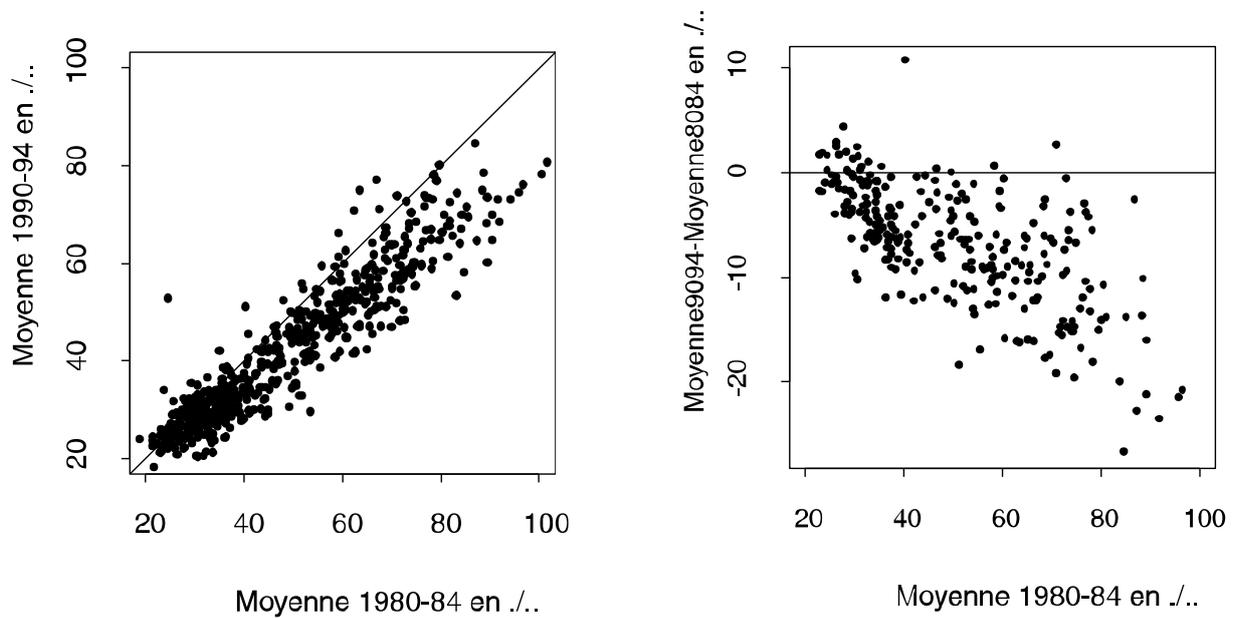


Figure 6 : Comparaison des teneurs moyennes communales du taux de matière organique des sols estimées pour les communes de Bretagne au cours des périodes 1980-85 et 1990-95 : (A) Teneurs moyennes 1990-95 en fonction des teneurs moyennes 1980-85 ; (B) Evolution des teneurs moyennes en fonction des teneurs moyennes initiales (99).

- ces structures spatiales de longue portée ne se limitent pas aux seules propriétés pérennes des sols, mais apparaissent également pour les propriétés fortement affectées par l'activité humaine (matière organique, P, K, oligo-éléments), pour lesquelles l'échelle parcellaire pouvait apparaître comme la structure spatiale exclusive. Elles traduisent l'effet de grands facteurs naturels (géologie, climat), mais également l'influence des grands types de systèmes de production.

L'analyse des critères de dispersion au sein des cantons est également intéressante : elle confirme de façon générale que la variabilité est d'autant plus forte que le niveau moyen est élevé, cela pour l'ensemble des propriétés des sols étudiées excepté le pH pour lequel la variabilité est maximale pour des valeurs moyennes proches de la neutralité. Il s'en suit que les cartes de teneurs doivent être interprétées avec précaution dans les zones où les teneurs moyennes sont élevées : à titre d'exemple, les teneurs moyennes ou médianes en phosphore extractible apparaissent très élevées dans de nombreux cantons de Bretagne, du Nord ou d'Alsace, mais cette seule observation occulte le fait qu'en général plus du quart des analyses sont jugées déficientes dans ces mêmes cantons.

II.2.3 L'utilisation des bases d'analyses de terre à des fins de surveillance des sols

Nous avons tenté de mettre en évidence des évolutions temporelles des propriétés des sols en comparant des jeux de données disponibles en Bretagne portant sur deux périodes à dix ans d'intervalle : 1980-1985 et 1990-95. Ce type de comparaison a rarement été tenté et on peut dire que l'évolution des propriétés des sols au cours des 40 dernières années, que l'on sait pourtant très importante, en particulier sur le plan chimique (Coppenet *et al.*, 1993), est très peu documentée (Cheverry, 1994).

En faisant l'hypothèse d'une distribution aléatoire des échantillons au sein des communes et d'une indépendance de l'échantillonnage entre les deux périodes, nous avons pu mettre en évidence une décroissance significative des teneurs moyennes en matière organique des sols, l'amplitude de la baisse étant proportionnelle aux teneurs initiales (Fig. 6). Cette baisse est conforme à une dynamique de premier ordre telle que prévue dans le modèle de Hénin et Dupuis (1945). Le travail de Balesdent (1996) simulant l'évolution des teneurs moyennes en matière organique des sols français en couplant le modèle de Hénin-Dupuis à des données historiques d'occupation des sols, confirme également la possibilité d'une telle baisse.

Néanmoins, les ordres de grandeur de variation de l'évolution temporelle sont nettement plus faibles que dans les analyses spatiales : dans l'exemple étudié, les variations de teneurs moyennes en matière organique entre des communes différentes sont comprises entre 0,1 et 6 % ; ces variations sont beaucoup plus faibles entre deux périodes, puisqu'elles sont comprises entre 0,1 et 0,5 %. L'évolution temporelle est de ce fait plus difficile à caractériser et sa quantification par des bases de données d'analyse de terre doit être conduite avec prudence en raison des biais possibles. Nous reviendrons sur ce point de l'analyse spatio-temporelle des propriétés des sols dans le dernier chapitre de ce mémoire.

In fine, nous avons montré que la création d'une banque de données d'analyses de terre offrait une source d'information nouvelle sur la variabilité des sols français : en raison des effectifs importants disponibles, des synthèses spatiales de données analytiques sont possibles sur des territoires très vastes qui mettent en évidence des structures spatiales de grande portée.

II.3. Le renouvellement des techniques de terrain

Si les progrès en matière de caractérisation analytique ou d'études du fonctionnement du sol ont été considérables au cours des dernières décennies, il est également frappant de constater que les techniques de terrain ont quant à elles très peu évolué, surtout si l'on considère les études de sol faites hors du cadre de la recherche, par exemple dans les bureaux d'étude ou les organismes professionnels. Le travail de terrain repose toujours sur : (i) le creusement de fosses ou de trous de tarière ; (ii) l'observation et la description semi-quantitative de critères morphologiques suivies de leur interprétation ; (iii) le prélèvement pour analyse complémentaire d'échantillons jugés représentatifs ou constitués par mélange de plusieurs prélèvements élémentaires. La mise en œuvre de la géostatistique a certes permis d'optimiser les stratégies d'échantillonnage, mais sans réellement modifier les moyens mis en œuvre.

Les principales limites de l'approche classique sont de trois ordres : d'une part, comme déjà évoqué, la résolution de l'échantillonnage est nécessairement faible (tab.1) ; d'autre part, l'approche morphologique, dont on ne saurait dénier l'intérêt, présente également des limites en particulier dans la difficulté (ou le risque) d'interpréter certains traits morphologiques en terme de fonctionnement actuel du sol ; enfin, les coûts associés aux déterminations analytiques de laboratoire limitent leur usage.

L'introduction de la télédétection dans les études spatiales des sols a représenté une première voie d'amélioration en fournissant une information continue dans l'espace, pouvant

être répétée dans le temps, de propriétés concernant les sols directement (couleur de surface, humidité, température (**10**)) ou indirectement (type de végétation). Le développement de nouveaux capteurs et l'augmentation constante de leur résolution (de l'ordre de 1 m pour la dernière génération) vont élargir encore l'intérêt de la télédétection dans l'analyse spatiale des sols (Girard et Girard, 1999). Néanmoins, cette généralisation que l'on peut prévoir de l'usage de la télédétection, doit également s'accompagner d'un renouvellement des techniques au sol : il semble en effet toujours indispensable de disposer de mesures directes des sols permettant l'établissement de corrélations avec les images-satellite ou encore l'analyse spatiale des sols dans des contextes (*i.e.* couvert végétal) ou pour des propriétés où la télédétection n'est pas pertinente.

J'ai participé à des travaux méthodologiques visant à ce renouvellement par la mise en œuvre de deux types de techniques.

II.3.1 L'introduction de la géophysique dans les études détaillées de sol

La géophysique regroupe un ensemble de techniques visant à mesurer des grandeurs physiques (conductivité, capacité) d'objets soumis à des stimulations naturelles ou provoquées, telles que des champs électromagnétiques, des ondes sismiques... Les variations spatiales de ces grandeurs sont ensuite reliées par des mesures directes ou par des modélisations à des variations des constituants ou des états des systèmes étudiés. Si l'application dans les domaines minier, géologique ou du génie civil est déjà ancienne, son introduction en science du sol est plus récente (Tabbagh *et al.*, 2000). Ses intérêts essentiels tiennent à la possibilité d'échantillonner de façon quasi-continue la couverture pédologique et au caractère non destructif de la mesure qui permet un suivi temporel de l'évolution du système.

Nous avons testé l'intérêt de la géophysique pour comprendre l'organisation des sols hydromorphes de fonds de vallées dans le cadre des travaux menés par le laboratoire de Rennes sur le rôle du milieu physique (**11**, **12**) dans la régulation biogéochimique des teneurs en nitrate de l'eau. Il semblait important dans ce contexte de pouvoir cartographier précisément certains types d'horizons de subsurface (horizon albique) ou de profondeur (altérite) susceptibles de contrôler la circulation de l'eau dans le paysage. Or, la variabilité très importante de ces sols, y compris sur de courtes distances, de même que les obstacles à leur étude (charge en cailloux, présence de nappes), rendent très difficile la mise en œuvre des techniques classiques.

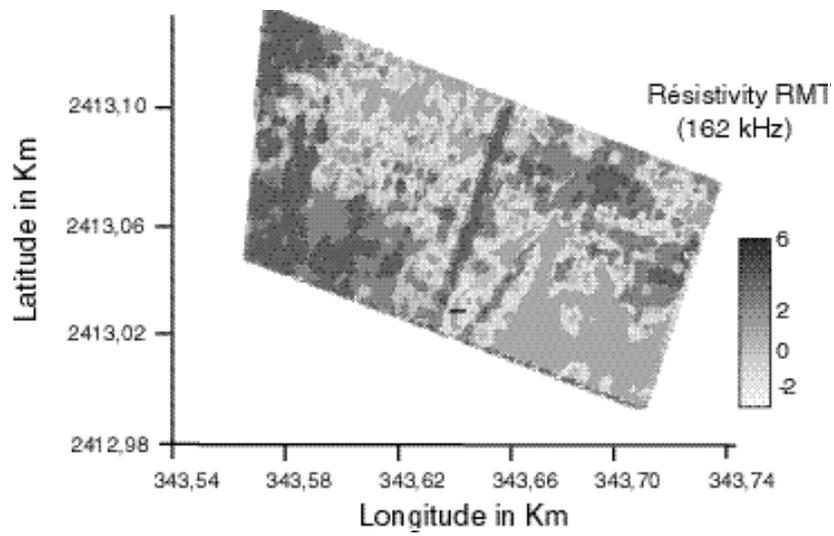


Figure 7 : Cartographie par krigeage ordinaire de la résistivité apparente d'une parcelle de 2 hectares par Radio-Magnéto-Tellurique à 162 KHz (**8**)

Différentes études (**8, 9, 44, 49**) menées en collaboration avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Nantes, nous ont permis de comparer les résultats de prospections géophysiques fondées principalement sur la radio-magnéto-tellurique avec des descriptions détaillées de l'organisation des horizons : sur granite dans la Manche, sur schiste dans les bassins versants de Naizin (56) ou de Nozay (44). Nous avons montré, que dans ces contextes où les variations texturales au sein du sol sont modérées, les variations du signal géophysique étaient fortement dépendantes de l'humidité des sols et de la profondeur de l'altération de la roche. Nous montrons néanmoins (**9**) qu'en filtrant l'effet de ces deux facteurs par un modèle statistique intégrant leur effet, nous mettons en évidence des variations résiduelles qui sont très clairement associées à des variations de l'horizon de subsurface (Fig. 7).

Ces résultats prolongent les acquis précédents sur l'intérêt des approches géophysiques dans le contexte particulier des sols du Massif armoricain (Mérot *et al.*, 1986) : il apparaît que la géophysique est intéressante pour des cartographies détaillées y compris dans des systèmes aussi complexes que les systèmes hydromorphes de fonds de vallée. Néanmoins, l'interprétation du signal est complexe car il intègre plusieurs processus et il semble indispensable de coupler une cartographie géophysique à des observations et des mesures classiques permettant de cerner les conditions de l'étude et les grands traits du milieu étudié.

II.3.2 L'utilisation de tests de terrain reliés au fonctionnement actuel du sol

L'utilisation de tests de terrain permettant d'appréhender directement le fonctionnement actuel du sol, est une autre voie intéressante : elle permet de valider les interprétations des observations morphologiques en terme de fonctionnement par la possibilité de les répéter souvent dans l'espace et dans le temps, ce que ne permettent pas des méthodes de laboratoire.

J'ai proposé d'utiliser un test indiquant la présence de Fer II dans la masse de l'échantillon pour étudier la variabilité spatio-temporelle des conditions de réduction du milieu, dont l'occurrence apparaît cruciale pour de nombreux processus biogéochimiques.

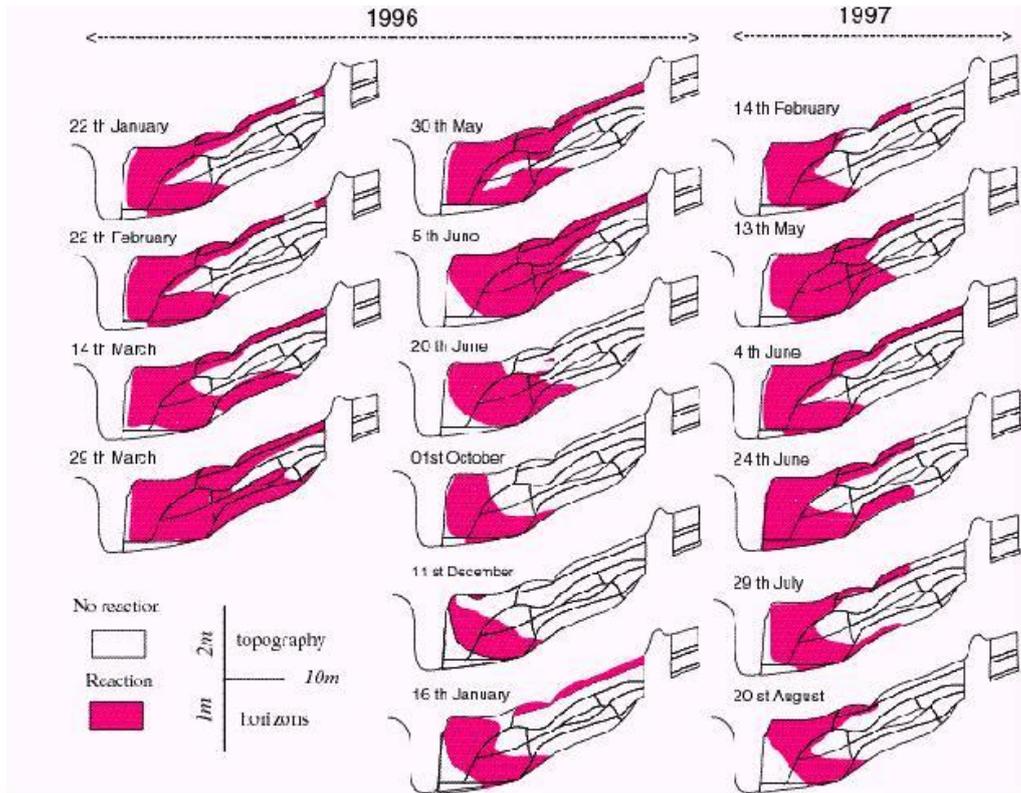


Figure 8 : Suivi en 1996 et 1997, par un test de présence de fer ferreux, de l'évolution des surfaces réactives au sein des horizons d'une toposéquence sur granite (7)

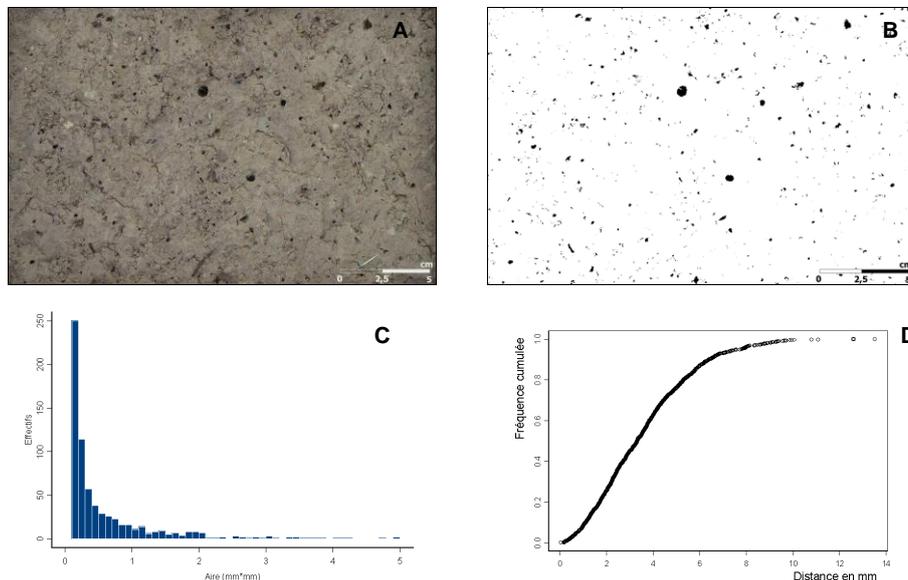


Figure 9 : La photographie numérique comme piste pour une meilleure quantification des descriptions morphologiques de terrain : (A) photographie d'une surface horizontale de (25*16) cm² ; B : extraction de la porosité d'origine biologique ; (C) Histogramme de la superficie des pores ; (D) Histogramme cumulé des distances des pores à leur voisin le plus proche (DEA de C. Ferrand, 2001).

Le test retenu (Chields, 1981 ; Bidois, 1999) qui suppose une simple application sur l'échantillon et l'observation d'une réaction colorée, a permis de cartographier très finement le long de deux versants l'évolution saisonnière des volumes présentant du fer ferreux (**7, 26**), mettant en évidence des évolutions très rapides dans les horizons de surface, l'absence de réaction dans les horizons intermédiaires et des évolutions spatiales beaucoup plus progressives dans les horizons profonds (Fig. 8). Il s'agit là de descriptions des dynamiques spatio-temporelles se produisant au sein des couvertures pédologiques qui ne peuvent être établies qu'avec ce type de tests. Ces descriptions ont permis de valider certains éléments de l'approche morphologique comme l'absence de fer ferreux dans les horizons bien drainés ou sa présence dans des horizons hydromorphes de surface ou des horizons réductiques de profondeur. Elles posent également des questions sur la signification en terme de fonctionnement actuel des traits morphologiques d'hydromorphie dans les horizons intermédiaires qui n'ont jamais réagi ou de façon exceptionnelle.

Néanmoins, le type de test employé, s'il permet de déceler des dynamiques et de poser des questions, apparaît trop frustré pour réellement comprendre les processus *in situ*. Il me semble de ce fait qu'il faille tendre vers la transposition sur le terrain de techniques analytiques de laboratoire en profitant des progrès technologiques dans le domaine des capteurs et de leur miniaturisation (Viscarra-Rossel et Mc Bratney, 1998 ; **31**).

II.3.3 Conclusion

Une attention insuffisante a été accordée aux méthodes de terrain ce qui induit des effets pervers importants dont la faiblesse de l'échantillonnage, le caractère partiellement subjectif de l'observation morphologique ou encore un doute sur la représentativité de l'échantillon dans le cas de mélange. Le rétablissement d'une recherche méthodologique dans ce domaine semble crucial. A l'image du développement important de la géophysique (groupe GEOFCAN), des progrès technologiques récents devraient permettre des avancées rapides en matière de description morphologique (par exemple par l'emploi de photos numériques haute résolution, Fig. 9) ou de caractérisation physico-chimique (sondes ISFET, spectrophotomètres de terrain).

III. PRÉDICTION ET MODÉLISATION SPATIALES

Ce chapitre aborde deux aspects complémentaires, mais néanmoins disjoints de l'analyse spatiale des sols, à savoir la prédiction et la modélisation spatiale des sols. La prédiction spatiale s'attache à estimer des propriétés de sols en des sites non reconnus, généralement par la prise en compte d'observations voisines. La modélisation spatiale cherche à représenter de façon simplifiée des processus (par exemple la circulation de l'eau dans un bassin-versant) ou des déterminants de la variabilité spatiale (par exemple l'effet de la topographie sur la distribution des sols) et à spatialiser les paramètres de cette représentation dans l'espace géographique.

Une approche *a priori* logique voudrait que l'on aborde en premier lieu la modélisation spatiale puisque pour prédire des propriétés des sols dans l'espace, il faut disposer d'un modèle de variation spatiale. En réalité, d'importants acquis méthodologiques ont d'abord été obtenus dans le domaine de la prédiction spatiale, soit en se fondant sur des modèles de pure statistique descriptive (les variogrammes), soit en adoptant des modèles peu explicites comme dans le cas de la cartographie pédologique classique. Ce n'est que de façon récente que le développement général des approches de modélisation dans les sciences de l'environnement couplé à la disponibilité de nouvelles informations spatiales (notamment topographiques) a conduit les spécialistes des sols à développer des modèles spatiaux explicites.

Ce chapitre présente de ce fait en premier lieu mes travaux en matière de prédiction spatiale avant d'aborder des aspects de modélisation spatiale.

III.1. La prédiction spatiale des propriétés du sol

III.1.1 Comparaison des estimations déduites de la carte pédologique et du krigeage

Le problème de la prédiction spatiale des propriétés du sol, à savoir estimer une valeur d'une propriété du sol en un point ou sur une surface intégratrice, peut être aisément posé.

Considérons Y une propriété du sol variant au sein d'un domaine géographique D et x un vecteur de coordonnées géographiques permettant de se repérer au sein de D . Y est généralement observé en un certain nombre de sites $y(x_i)$. Si on note Y^* une estimation de Y , on cherche à prédire $y^*(x_0)$ en un point x_0 quelconque. On peut également chercher à estimer non pas strictement en un point, mais sur une surface intégrative s .

La géostatistique linéaire classique résout ce problème par un certain nombre d'hypothèses (Cressie, 1991) : on considère en particulier que Y est une fonction aléatoire qui varie de façon continue sur le domaine géographique D . Sous des hypothèses de stationnarité, elle propose alors une solution optimale de la prédiction de $y^*(\mathbf{x}_0)$ à partir d'observations effectives $y(\mathbf{x}_i)$ dérivée de l'ajustement d'une fonction autorisée au variogramme expérimental, qui décrit de façon statistique les corrélations entre des points selon la distance qui les sépare. De plus, elle associe à cette prédiction une indication de sa précision sous forme d'une variance de prédiction dépendant de la forme du variogramme et du plan d'échantillonnage.

Les méthodes de base initialement développées (krigeage ordinaire, krigeage simple) étaient adaptées au traitement d'une seule variable continue en des points ou sur des blocs. De nombreux travaux méthodologiques portant souvent sur des jeux de données pédologiques, ont élargi le champ d'application initial : - krigeage disjonctif (Yates et Yates, 1988) ; - co-krigeage (Stein *et al.*, 1988 ; **6**) ou krigeage avec dérive externe (Bourennane *et al.*, 1996) permettant de prédire une propriété en profitant des corrélations avec une autre variable mieux échantillonnée ; - krigeage d'indicatrices (Journel, 1983 ; **23**) adapté aux variables qualitatives ; - krigeage factoriel (Goovaerts, 1997 ; Wackernagel, 1998) permettant de traiter de façon conjointe plusieurs propriétés.

La prédiction spatiale d'une propriété du sol peut également être envisagée par une simple lecture de carte pédologique : on associe au point considéré les caractéristiques de la plage cartographique qui l'englobe. Ces caractéristiques sont déduites de la définition même de l'unité cartographique si la propriété considérée est un critère cartographique retenu par le pédologue ; sinon elles sont issues des données acquises sur un ou plusieurs profils jugés représentatifs de l'unité cartographique. Sauf à s'assurer d'un échantillonnage indépendant de vérification (Cf. §II), on ne dispose pas, contrairement à la géostatistique, d'indicateur de la précision des estimations faites ; par contre l'information prise en compte dans l'estimation est *a priori* plus riche car le tracé des limites ne considère pas uniquement les seules observations ponctuelles du sol, mais également les variations d'autres composantes du milieu (topographie, végétation, géologie) qui paraissent liées à des variations du sol.

J'ai comparé (**1**, **23**) sur un secteur de 1 500 ha du Massif armoricain des prédictions de la profondeur du sol et des classes d'hydromorphie déduites d'une part d'une carte pédologique détaillée (1:25 000), obtenues d'autre part par krigeage ordinaire ou par krigeage d'indicatrices mis en œuvre sur les observations ponctuelles.

	Classes de profondeur du sol			Classe d'hydromorphie		
	Moyenne des écarts	Moyenne de la valeur absolue des écarts	Rang moyen	Moyenne des écarts	Moyenne de la valeur absolue des écarts	Rang moyen
Estimations par la carte pédologique	-0.6	1.4	1.5	-0.5	0.9	1.3
Estimations par le krigeage	0.4	1.5	1.5	1.6	2.0	1.7

Tableau 3: Paramètres statistiques des écarts entre les valeurs estimées par la carte pédologique ou le krigeage d'indicatrices et les valeurs observées en des points indépendants de vérification (23)

Confrontées aux cartes dérivées de la carte pédologique, les cartes krigées révèlent les mêmes traits majeurs mais s'avèrent plus lissées. Un échantillonnage indépendant de vérification indique que la carte pédologique constitue un estimateur ayant une précision équivalente à celle du krigeage pour la profondeur du sol et meilleure pour la classe d'hydromorphie (tab. 3).

Ce type de résultat rejoint ceux de nombreux autres travaux : sur des surfaces importantes, les observations ponctuelles disponibles sont en règle générale trop peu nombreuses pour permettre une analyse géostatistique conduisant à des prédictions spatiales précises. Par ailleurs, les hypothèses de stationnarité sous-jacentes à cette analyse risquent d'être invalides. Ce constat a incité différents auteurs à coupler les approches géostatistiques à celles de cartographie pédologique. Nous avons fait une revue bibliographique (**14, 76**) de l'intérêt d'un tel couplage, présentant les différentes approches envisageables qui étaient à l'époque de deux ordres : le krigeage intra-strate (Voltz et Webster, 1990) permettant une analyse géostatistique au sein des plages d'une carte pédologique existante ; le co-krigeage qui utilise une covariable telle qu'un critère cartographique de la carte pédologique (Stein *et al.*, 1988). D'autres techniques ont été développées depuis lors en particulier le krigeage avec une dérive externe qualitative (Monestiez *et al.*, 1999)

III.1.2 Le krigeage de propriétés du sol par des variogrammes locaux

Le krigeage avec des variogrammes locaux représente une autre voie permettant de tenir compte des risques de non-stationnarité quand on applique la géostatistique sur des surfaces importantes. Initialement développé par Haas (1990) pour cartographier des dépôts atmosphériques sur tout le continent américain, son principe consiste à répéter la phase de calcul et d'ajustement du variogramme expérimental en tout point de prédiction, contrairement à la démarche habituelle où un même variogramme global est toujours utilisé. Cette méthode présente ainsi *a priori* l'avantage de pouvoir s'adapter aisément à des variations de la structure spatiale des propriétés ; son défaut d'accroître les temps de calcul est fortement limité par l'augmentation incessante de la puissance de calcul des ordinateurs.

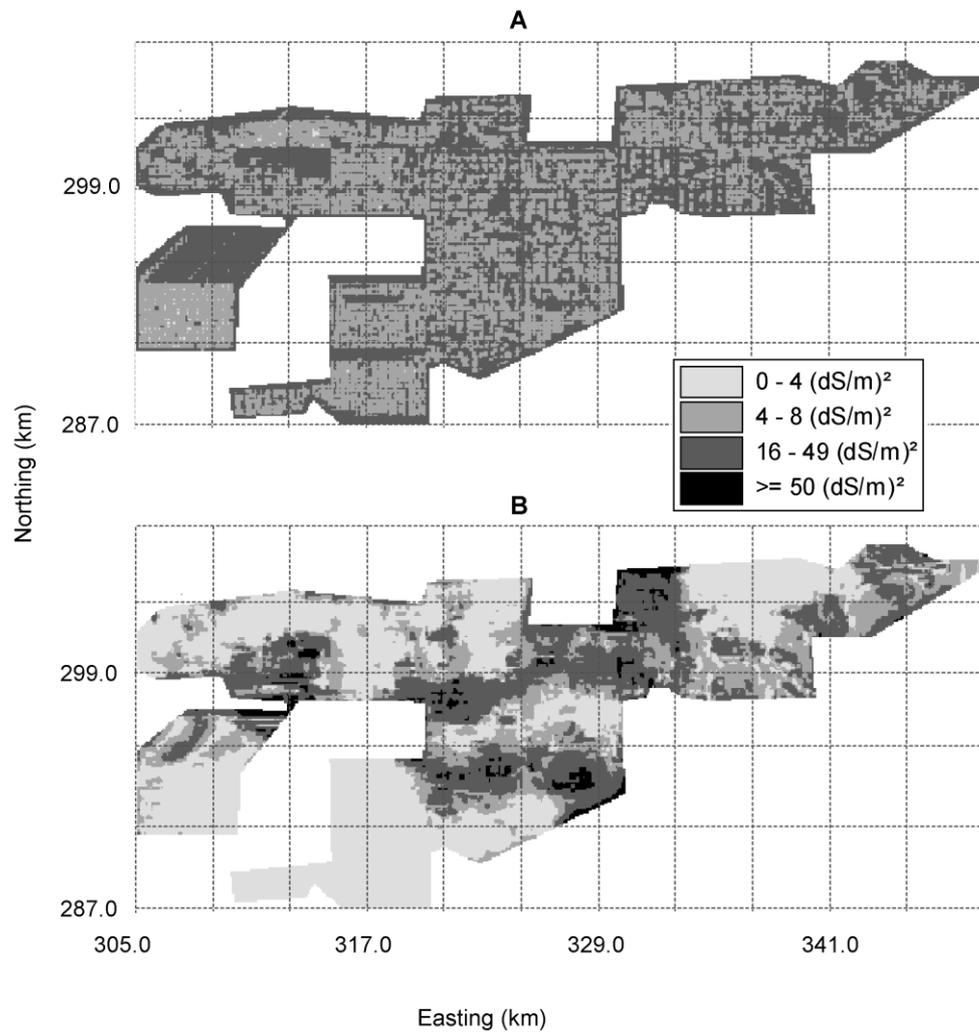


Figure 10 : Cartographies des variances d'estimation de la conductivité électrique de l'horizon de surface de la plaine du Cheliff (Algérie) (25) : (A) par krigeage ordinaire utilisant un variogramme global sur l'ensemble de la zone d'étude ; (B) par krigeage ordinaire utilisant un variogramme local.

Cette méthode est apparue particulièrement adaptée pour cartographier la salinité des sols de la vallée du Cheliff (Algérie) (**25**) : de nombreuses mesures (plus de 5 000) de conductivité électrique étaient disponibles ; la surface considérée était par contre importante (40 000 ha) et des travaux antérieurs avaient montré la grande diversité géologique et pédologique de cette vallée. Nous avons montré que les structures spatiales de la salinité étaient très fortement variables selon les secteurs considérés et que l'application d'un même variogramme global gommait ces changements. Au contraire, le krigeage avec des variogrammes locaux en tenait compte et a permis de cartographier la salinité de sols de la vallée en considérant des blocs de 250 m x 250 m.

L'intérêt essentiel de cette approche ne réside pas tant dans les prédictions proprement dites que dans celles des **indicateurs de précision associés** : la carte des variances d'estimation du krigeage avec un variogramme global (Fig. 10.A) apparaît peu variable et ne dépendant que de la proximité aux points de mesure ; au contraire, celle du krigeage avec des variogrammes locaux (Fig. 10.B) est beaucoup plus structurée, distinguant des zones de faible variabilité où la prédiction de la salinité peut être considérée précise, de zones de très forte variabilité à courte distance où la prédiction du niveau de salinité est très incertaine.

Nous avons montré par différents types de validation que les variances d'estimation du krigeage avec des variogrammes locaux étaient non biaisées. Nous avons également souligné que ces différences de variance d'estimation avaient des conséquences pratiques : quand on cherche à estimer la proportion de sols susceptibles d'être très salés au sein de la vallée, on trouve une proportion de 60 % par le krigeage avec un variogramme global et seulement de 40 % avec un krigeage avec des variogrammes locaux !

III.1.3 L'emploi des processus ponctuels pour étudier des sols contaminés

La géostatistique considère que les propriétés varient selon un index continu dans l'espace géographique ; cette hypothèse paraît particulièrement adaptée pour la couverture pédologique qui est généralement présente partout. Néanmoins, cette continuité générale n'est pas toujours vérifiée : à titre d'exemple, la pollution d'un sol par le plomb peut être le fait d'événements purement locaux (batteries) qui n'induisent aucune continuité spatiale.

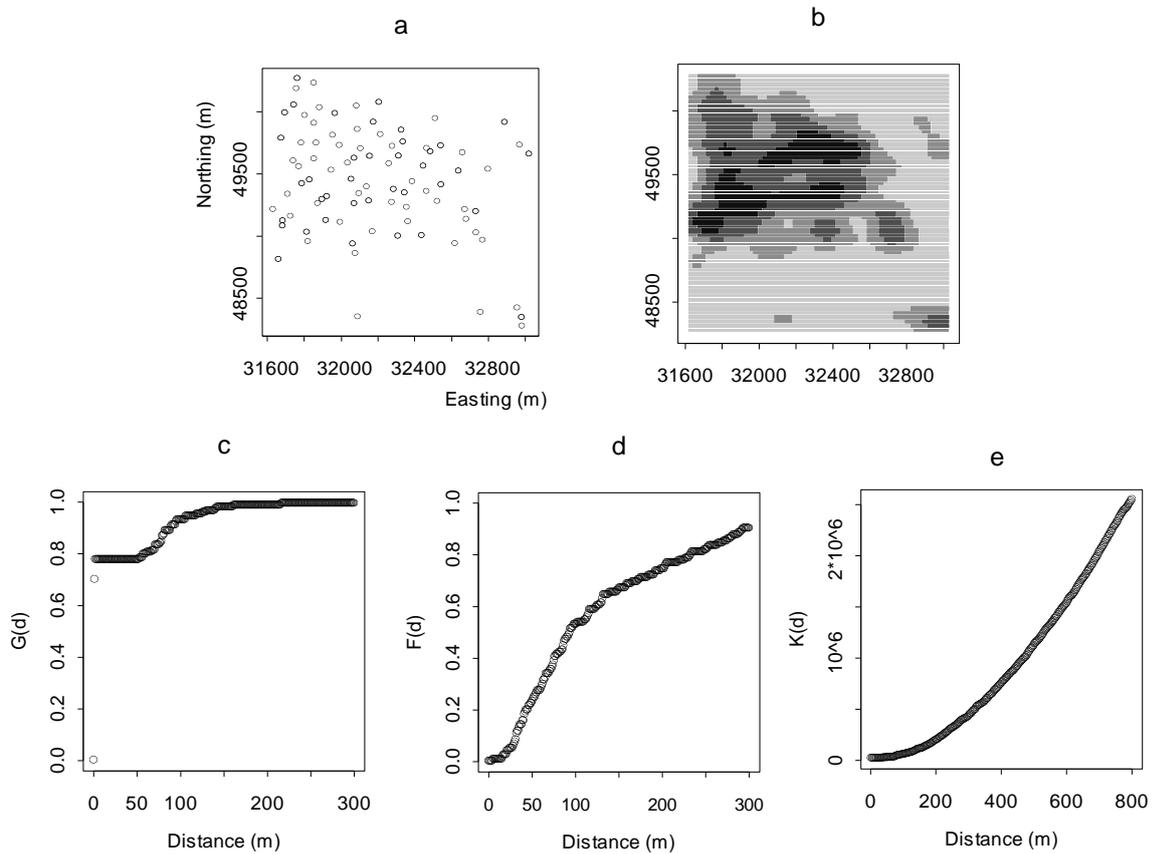


Figure 11 : Caractérisation de la variabilité spatiale de teneurs en plomb des sols d'un quartier de Sydney par des statistiques de processus ponctuels (26) : (a) Localisation des points présentant de très fortes teneurs ; (b) Cartographie de l'intensité des teneurs élevées par une fonction noyau ; (c ; d ; e) Statistiques G, F, K (Ripley, 1976) des processus ponctuels permettant d'analyser la distribution spatiale des points dans l'espace et de la comparer à celle de processus connus (aléatoire, agrégé, régulier).

Par ailleurs, le variogramme qui est l'outil généralement utilisé pour analyser la structure spatiale d'une propriété du sol, donne peu d'information sur la nature des processus spatiaux à l'origine d'une variabilité observée : on peut facilement montrer (26) que des processus de nature différente (aléatoire, agrégé, régulier) peuvent conduire à des variogrammes similaires pour peu qu'on leur applique une diffusion spatiale.

Ces considérations nous ont amené à tester de façon exploratoire la statistique des processus ponctuels (26) pour analyser les teneurs en plomb des sols d'un quartier de Sydney (Australie). Cette statistique (Ripley, 1976 ; Diggle, 1983) s'attache aux processus stochastiques qui génèrent un nombre fini d'événements ponctuels. Elle fournit par ailleurs un ensemble de statistiques descriptives fondées sur l'analyse des distances entre des événements voisins ou entre des événements et des points fixes, qui peuvent être comparées à celles issues de processus connus et simulés sur le domaine d'étude avec la même intensité que le processus expérimental (Fig. 11).

Appliquée aux données de plomb de Sydney, cette statistique des processus ponctuels a permis d'identifier des processus différents selon l'ordre de grandeur des valeurs : les valeurs les plus fortes correspondent à un processus fortement agrégé, alors que les valeurs faibles et moyennes sont rattachées à des processus aléatoires ou réguliers. Cela suggère que la contamination des sols résulte de divers processus : d'une part, des processus réguliers ou aléatoires avec une certaine diffusion pour la population générale ; d'autre part, des processus fortement agrégés pour les teneurs les plus fortes suggérant des pollutions ponctuelles.

Une analyse géostatistique classique aurait ainsi tendance à sous-estimer les zones de teneurs en plomb élevées, celles-ci contribuant de par leur répartition spatiale à un effet pépète important du variogramme, induisant un lissage des prédictions spatiales par krigeage aux dépens des valeurs les plus fortes. La carte de l'intensité des teneurs élevées (Fig. 11.B), qui donne la probabilité qu'une valeur élevée soit observée sur une surface donnée, apparaît de ce fait plus utile si l'on s'intéresse aux zones les plus fortement contaminées.

Ainsi, ce type d'approche semble clairement avoir sa place parmi les outils de l'analyse spatiale des sols par son aptitude à comparer une variabilité observée à des processus simulés dont on connaît les caractéristiques. Néanmoins, il faut bien admettre que son application aux sols pose également des difficultés, la principale d'entre elles étant que les événements (par exemple, les points de teneurs fortes) ne sont pas connus de façon exhaustive, mais résultent d'un processus d'échantillonnage. Il est donc difficile de

déterminer l'intensité globale du processus ponctuel sur le domaine d'étude ce qui rend délicate la simulation des processus.

La résolution de tels problèmes méthodologiques est clairement hors de portée de mes compétences et je ne compte pas investir davantage dans ce domaine. Il m'a semblé néanmoins intéressant d'explorer ce domaine des processus ponctuels négligés jusque là par les spécialistes des sols en raison d'une conception exclusive du sol comme un objet continu dans l'espace. Or, de nombreux processus ou attributs du sol pourraient être assimilés à des événements ponctuels, par exemple la présence de vers de terre, la répartition des éléments grossiers dans la masse du sol ou encore la distribution de la porosité. Les outils des statistiques des processus ponctuels sont particulièrement intéressants pour décrire les relations de voisinage entre les événements d'un processus ; ils pourraient donc être d'avantage mis à profit pour analyser et comprendre l'organisation et les dépendances spatiales à courte distance d'entités présentes dans le sol.

III.2. La modélisation de la distribution spatiale des sols

III.2.1 Introduction

Les approches de cartographie pédologique ou relevant de statistiques spatiales que nous avons mises en œuvre jusque là ne définissaient pas de façon explicite les déterminants de la variabilité spatiale des sols. Au contraire, nous avons vu que l'emploi des méthodes géostatistiques visait justement à s'affranchir de ces déterminants, source d'interprétations abusives ou erronées, pour s'en tenir à des approches purement descriptives fondées sur des corrélations spatiales entre des observations voisines. On peut ainsi adopter l'expression du livre de R. Thom « Prédire n'est pas comprendre » (1993) et constater que l'on peut effectivement prédire sans comprendre l'ensemble des processus ayant conduit à l'organisation actuelle des sols. Cette idée est poussée à l'extrême dans des travaux récents utilisant les réseaux de neurones pour prédire dans l'espace des propriétés des sols, démarche qui a conduit dans certains cas à des estimations plus précises que la cartographie pédologique classique (Zhu, 2000), en l'absence de compréhension des processus en jeu.

Néanmoins, l'idée de réintégrer de façon explicite certains déterminants majeurs de la distribution spatiale des sols dans l'analyse spatiale des sols s'est imposée à la fois pour des raisons épistémologiques et d'opportunité scientifique. En premier lieu, il s'agit bien sûr de

rétablir le lien en matière de connaissance scientifique entre une réalité observée et ses causes. La seule efficacité prédictive ne saurait être un critère déterminant et on préférera une méthode induisant une incertitude plus grande, mais fondée sur des facteurs et des processus explicites susceptibles d'être validés, affinés au fur et à mesure du progrès des connaissances et extrapolés en dehors du site de construction du modèle. La seconde raison tient à la disponibilité croissante de bases de données exhaustives sur des déterminants des sols, par exemple la topographie pour laquelle on dispose à présent de Modèles Numériques de Terrain d'une résolution spatiale de l'ordre de 50 m ou mieux. Ces nouveaux gisements d'informations ouvrent des possibilités de prédiction spatiale sur de grandes superficies dès lors que l'on se fonde sur des relations dûment établies entre les sols et des facteurs extrinsèques, qualifiées par certains de lois de distribution des sols dans les paysages (Bourennane, 1997 ; Thomas *et al.*, 1999b)

Plusieurs thèses récentes ont contribué à développer cette approche en France : elles ont porté sur la distribution des sols selon le modelé et le substrat (Lagacherie, 1992 ; Robbez-Masson, 1994), la prédiction spatio-temporelle des teneurs en carbone des sols (Arrouays, 1995 ; Jolivet, 2000) ou la présence d'un type d'horizon (Bourennane, 1997 ; King *et al.*, 1999). Au niveau international, on retiendra par exemple le travail de Bui *et al.* (1999) portant sur la modélisation de la distribution des sols à l'échelle du bassin versant du Murray Head en Australie, sur une superficie du même ordre que la France entière, en se fondant sur les déterminants de substrat et topographiques.

III.2.2 La modélisation topographique des sols hydromorphes de fonds de vallée

Les travaux de recherche menés au sein de l'UMR rennais sur l'organisation et le fonctionnement des sols hydromorphes de fonds de vallée (programmes CORMORAN et TYFON) ont été l'occasion de développer une approche originale de modélisation spatiale fondée sur la prise en compte du déterminant topographique. Cette approche a été initiée par plusieurs mémoires avant de faire l'objet de la thèse de V. Chaplot (1998).

Les sols hydromorphes de fonds de vallée constituent en effet un écosystème particulier lié notamment à leur saturation en eau de durée variable et à leur position d'interface entre les sols de versant et le cours d'eau. Les travaux d'analyse et de modélisation spatiale visaient, d'une part à mieux caractériser les relations spatiales entre les différents types de sol de ce domaine, d'autre part à développer et tester un modèle de prédiction susceptible de délimiter leur extension au sein des paysages.

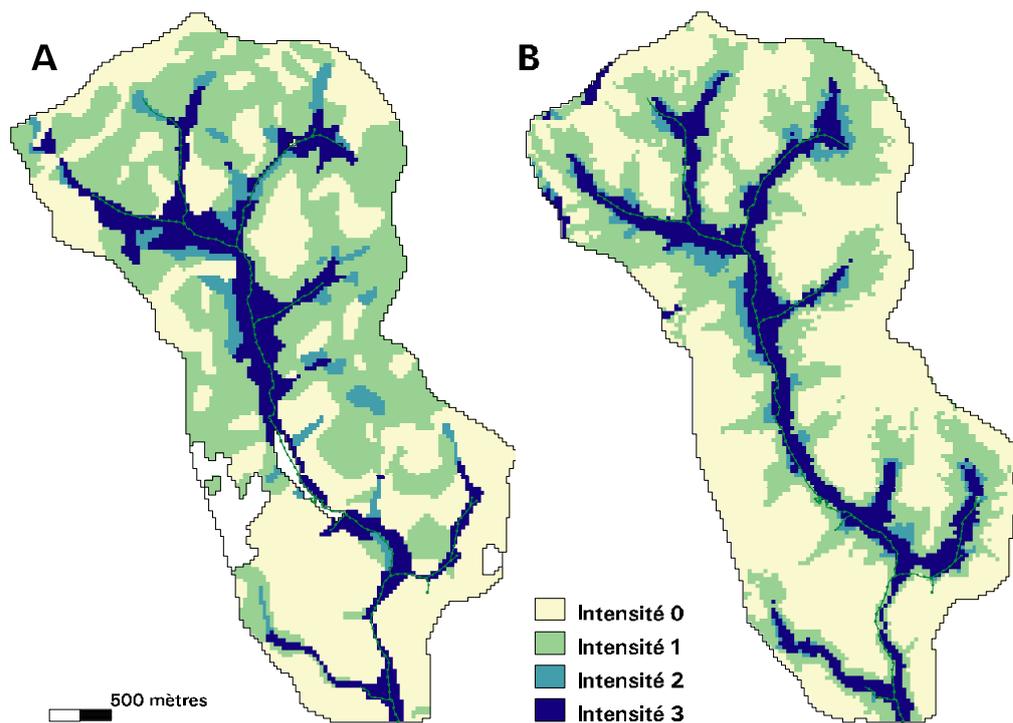


Figure 12 : Comparaison sur le bassin versant de Naizin (Morbihan) d'une superficie de 1200 ha de la cartographie de l'intensité de l'hydromorphie des sols fondée sur 900 observations ponctuelles (A), à celle déduite d'une modélisation topographique (B) (12, 40)

La distribution spatiale des sols hydromorphes a été modélisée à partir de l'information topographique, déterminant majeur de cette distribution et disponible de façon exhaustive à travers les Modèles Numériques de Terrain (MNT).

Les premiers travaux ont consisté à comparer l'extension des zones hydromorphes délimitées sur des cartes pédologiques existantes à des cartes d'attributs topographiques (15). Le croisement était fondé sur une comparaison des surfaces des sols hydromorphes et des indices topographiques, sans validation sur le terrain. Il avait néanmoins décelé la pertinence d'un indice topographique tenant compte de la surface drainée et de la pente comme indicateur des durées d'engorgement en eau et par suite de l'hydromorphie des sols (Fig. 12).

Les travaux ultérieurs ont cherché à fonder de façon plus rigoureuse ces premiers résultats et ont porté sur les différentes étapes d'une modélisation spatiale des sols.

a) La construction du modèle

Nous avons choisi de fonder la construction du modèle sur l'étude détaillée de nombreuses situations pédologiques, en décrivant l'organisation spatiale des horizons selon une démarche d'« analyse structurale » (Curmi *et al.*, 1994) et en effectuant un levé topographique détaillé. Plus d'une trentaine de toposéquences ont ainsi été étudiées dans les bassins versants de Naizin (Morbihan), de la Roche et du Moulinet (Manche), de Nozay (Loire-Atlantique) sur des substrats de type granite ou schiste tendre recouverts dans certains cas par des apports éoliens. Ces études détaillées ont également été l'occasion de tester de nouvelles techniques de terrain comme la géophysique et l'utilisation de tests colorimétriques (Cf. § II.3).

Nous avons d'abord montré que la façon habituelle de synthétiser l'hydromorphie des sols sous forme de classes tenant compte de la profondeur d'apparition et de l'abondance des taches d'hydromorphie, n'était pas pleinement satisfaisante. Elle ne discrimine pas en effet les situations où l'hydromorphie apparaît dès la surface alors qu'il nous est apparu qu'une telle distinction était indispensable pour comprendre l'organisation et le fonctionnement de ces sols (3, 7). Nous avons de ce fait proposé de synthétiser le développement de l'hydromorphie, qui discrimine les différents termes du système pédologique, par un indice quantitatif et continu noté *HI*, basé sur la couleur de l'horizon de surface et l'épaisseur du sol affectée par l'hydromorphie (3, 7). *HI* est défini en tout point repéré par un vecteur de coordonnées géographiques \mathbf{x} par :

Prediction errors of HI for the different DEMs and prediction techniques at 41 validation points (mean error: ME; mean absolute error: MAE; mean rank of the prediction technique for a given DEM)

DEM cell size (m)	Prediction technique	ME	MAE	Mean rank
DEM 10 CNT	Regression	1.5	5.3	2.4
	Co-kriging 10	-0.5	4.2	2.2
	Co-kriging 60	-0.5	2.7	1.5
DEM 20 CN	Regression	1.9	5.2	2.3
	Co-kriging 10	0.2	4.3	1.9
	Co-kriging 60	-0.2	3.0	1.6
DEM 30 CN	Regression	-6.7	7.6	2.3
	Co-kriging 10	-0.1	5.5	2.1
	Co-kriging 60	-0.7	2.6	1.4
DEM 50 CN	Regression	17.6	22.5	2.8
	Co-kriging 10	5.4	12.6	2.0
	Co-kriging 60	-0.6	2.6	1.2
	Ordinary kriging 10	1.9	12.7	
	Ordinary kriging 60	1.7	5.0	

Tableau 4 : Erreurs de prédiction de l'indice d'hydromorphie pour des MNT de résolution décroissante et pour différentes techniques de prédiction (6)

$$HI(\mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x})}{V_1(\mathbf{x}) \times C_1(\mathbf{x})}$$

où $P(\mathbf{x})$ en % représente l'épaisseur cumulée des horizons hydromorphes rapportée à l'épaisseur totale des horizons ; $V_1(\mathbf{x})$ et $C_1(\mathbf{x})$ sont les valeurs de clarté et de pureté de la couleur MUNSELL de la matrice de l'horizon de surface. HI varie ainsi en théorie d'un minimum de 0 (absence d'horizons hydromorphes) à un maximum de 100 pour des sols entièrement hydromorphes avec un horizon de surface très sombre ($V_1(\mathbf{x}) \times C_1(\mathbf{x}) = 1$) observé en particulier dans les horizons tourbeux.

Par la suite, nous avons construit un modèle de régression, fondé sur les sites d'étude détaillée, reliant cet indice d'hydromorphie HI à des critères topographiques. Sur l'ensemble des sites de la Manche étudiés par Chaplot (1998), la régression la plus significative est la suivante :

$$HI_{reg} = 3.1 CTI - 3.4 ES \quad (r^2 = 0.81)$$

où CTI est défini en tout point par le logarithme népérien de l'aire drainée multidirectionnelle divisée par la pente et ES est la dénivelée entre l'altitude du point et le cours d'eau. Il est intéressant de noter qu'à partir des nombreux critères topographiques injectés en entrée dans la régression, s'imposent en sortie des critères ayant un sens physique en matière de processus induisant l'hydromorphie des sols. En effet, CTI est un critère adapté de la modélisation hydrologique (Beven et Kirkby, 1979 ; Gascuel-Oudou, 1998) puisqu'il gouverne sous des hypothèses simplificatrices la durée d'engorgement en eau d'un point ; de même, Crave et Gascuel (1996) ont montré l'intérêt du critère ES pour comprendre la répartition spatiale et temporelle de mesures d'humidité dans des fonds de vallée, du fait de sa relation avec la hauteur de la nappe dans le sol.

b) La validation du modèle

Cette validation a été fondée sur des jeux de données constitués de points observés indépendamment de la construction des modèles. Ces jeux de validation nous ont permis de tester différentes étapes-clés de cette approche de modélisation spatiale.

Le tableau 4 permet, en premier lieu, de juger de l'efficacité prédictive de la modélisation topographique en comparaison de méthodes géostatistiques.

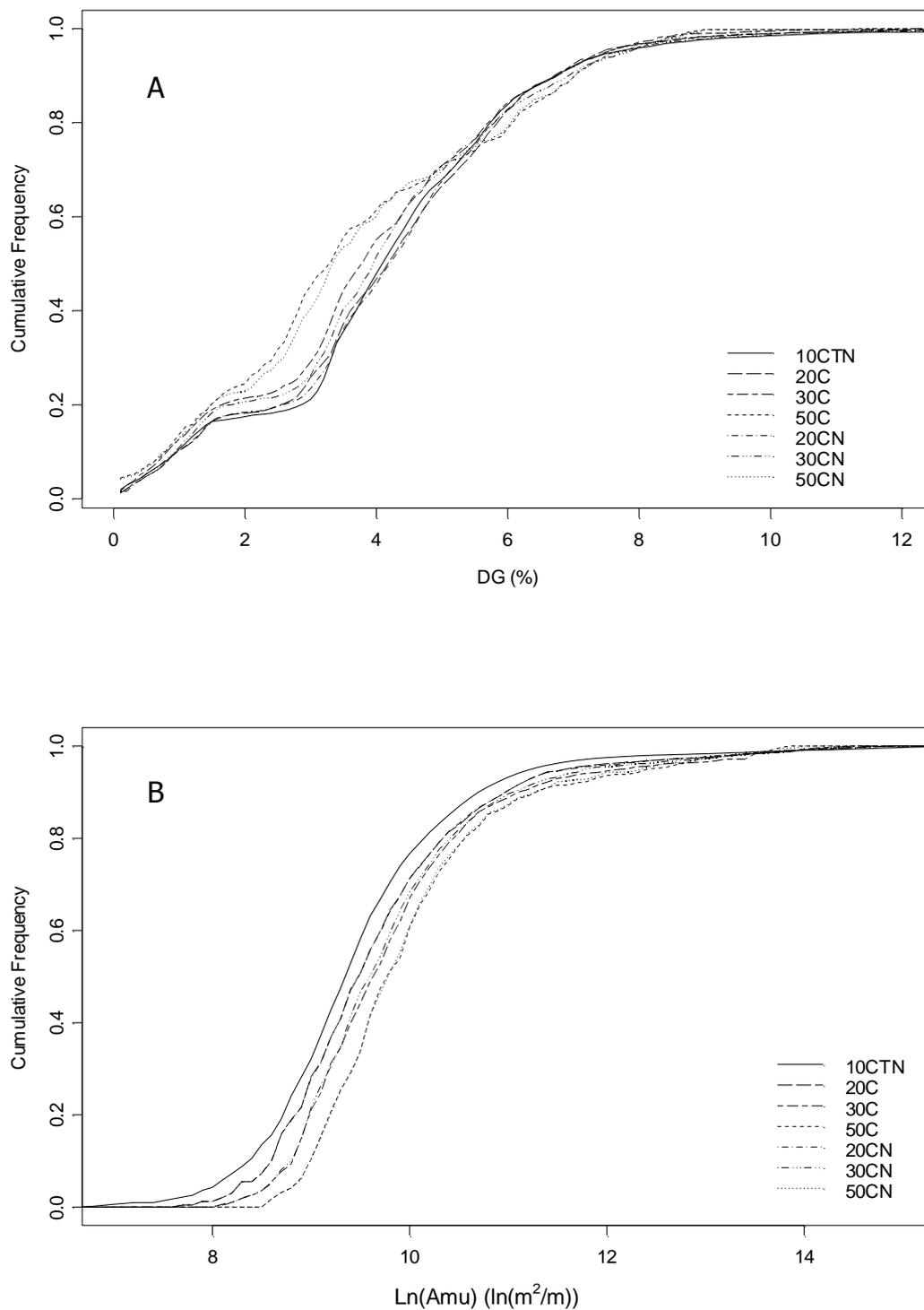


Figure 13 : Fréquences cumulées des valeurs de pente (A) et d'aires drainées (B) pour le bassin versant de la Roche (Manche), estimées à partir de modèles numériques de terrain d'une résolution de 10 (10CTN), 20 (20C, 20CN), 30 (30C, 30CN) ou 50 (50C, 50CN) mètres (6).

Il apparaît que dans les meilleures conditions, *i.e.* quand un MNT de bonne résolution est disponible, les erreurs de prédiction du modèle topographique sont inférieures à celles obtenues par krigeage ordinaire même avec un nombre de sondages par ha très important. Néanmoins, la qualité prédictive du modèle topographique est très sensible à la qualité de l'information topographique et, en premier lieu, à la résolution du MNT : pour des MNT ayant une résolution de 50 m, l'erreur de prédiction de la modélisation topographique est apparue très supérieure à celle de l'ensemble des autres méthodes testées, alors qu'elle est du même ordre ou plus faible pour un MNT de résolution meilleure. Cela s'explique par l'utilisation dans le modèle topographique de variables dérivées du MNT comme les aires drainées et les pentes dont la distribution est très fortement affectée par la taille du MNT (Fig. 13).

Nous avons de ce fait proposé **(6)** d'utiliser des méthodes couplées, à l'instar du co-krigeage, associant les techniques d'interpolation et la modélisation topographique. Nous pouvons en effet considérer les prédictions issues de la modélisation topographique comme une variable auxiliaire dans une procédure de co-krigeage portant sur une propriété principale qui est l'indice d'hydromorphie observé en quelques points. Cette procédure présente plusieurs avantages : (i) elle intègre dans la procédure d'interpolation le bénéfice de la prise en compte du déterminant topographique ; (ii) elle permet d'associer des approches de terrain fondées sur les observations et les approches de modélisation. Les tests de validation confirment l'intérêt de ce type d'approche en particulier dans des situations où l'information topographique est de qualité médiocre (Tab. 4).

c) L'extrapolation à l'échelle régionale

L'extrapolation de ce type de modèle à l'ensemble du Massif armoricain a été analysée par l'étude de cartes pédologiques au 1/25000 existantes choisies dans les différents compartiments tectoniques du Massif armoricain. La proportion relative de sols hydromorphes estimée sur 280 toposéquences tirées au hasard a montré l'influence de deux autres facteurs : d'une part, le rôle déjà connu du type de substrat ; d'autre part la tectonique récente susceptible d'influencer l'épaisseur des altérites **(4, 5)**. Un tel résultat suggère d'intégrer un second facteur dans la modélisation spatiale des sols hydromorphes qui est celle de la nature et de l'épaisseur des altérites. Une telle intégration devra se fonder sur les travaux des géomorphologues de Géosciences Rennes qui entreprennent la cartographie des altérites du Massif armoricain.

III.2.3 Perspectives

In fine, la modélisation spatiale des sols hydromorphes a montré son efficacité prédictive ; elle est susceptible d'être utilisée en routine dans les études d'impact y compris à l'échelle régionale pour estimer les zones hydromorphes potentielles (Aurousseau et Squividan, 1996 ; Durand *et al.*, 2000) ou caractériser des pédopaysages (92, 102). Les perspectives en la matière sont de ce fait de considérer la modélisation spatiale des sols comme un outil susceptible de nous aider à appréhender l'effet d'autres facteurs sur l'organisation des sols. Dans ce sens, une thématique de recherche intéressante est d'analyser le rôle des systèmes haies-talus sur l'épaisseur des horizons organo-minéraux des sols et de façon induite sur la séquestration de carbone dans les paysages du Massif armoricain. Les premiers travaux (27, Layer, 2000) montrent que cet effet est marqué mais qu'il dépend des caractéristiques générales des sols, de la position de la haie dans le versant et des caractéristiques de forme de ce versant. Il s'agit là de facteurs pouvant être intégrés dans une démarche de modélisation spatiale qui permettrait d'en tester les effets au niveau du paysage et qui contribuerait également à une meilleure évaluation du réseau bocager.

III.3. Prise en compte de la variabilité spatiale des sols dans la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique a connu un fort renouveau lié au développement, au début des années 1990, de thèmes de recherches abordant l'impact des systèmes de production agricole sur la qualité de l'eau : il s'agit en effet d'un outil privilégié pour faire le lien entre des pratiques potentiellement polluantes, raisonnées à l'échelle de la parcelle agricole, et leurs effets sur la qualité de l'eau généralement observés à l'exutoire de bassins versants de quelques milliers d'hectares. J'ai participé aux travaux de recherche menés au laboratoire de Rennes (programmes CORMORAN, TYFON, ECOSPACE) visant à développer des modèles hydrologiques intégrant l'effet de l'organisation du milieu physique sur la qualité de l'eau et capables de tester l'efficacité d'aménagements (zones humides, haies, agencement spatial des parcelles agricoles) susceptibles de préserver la ressource en eau (Cheverry, 1998).

Dans ce cadre, je me suis intéressé à la spatialisation de paramètres liés au sol intervenant dans les modèles hydrologiques retenus dans ces projets, en particulier *Topmodel* (Beven et Kirkby, 1979) : au sein de chacune des mailles discrétisant le bassin

versant étudié, celui-ci considère le sol comme un seul réservoir qui se remplit et se vide selon l'état du réservoir et la vitesse des transferts ; deux grandeurs caractéristiques du sol sont donc prises en compte, les teneurs en eau à différents potentiels et la transmissivité. Intégrer l'organisation spatiale des sols dans une modélisation hydrologique fondée sur *Topmodel* suppose donc d'associer, à chaque maille, une estimation de ces deux propriétés, par exemple sous la forme d'une valeur moyenne par maille.

Sur le strict plan de l'analyse spatiale des sols, un tel couplage pose trois types de difficultés : (i) les paramètres du sol sont imposés ; dans le cas présent, ces paramètres ne peuvent faire l'objet d'une mesure expérimentale directe intégrant le sol dans son ensemble et sont déduits de mesures peu nombreuses portant sur les horizons ; (ii) la résolution spatiale, *i.e.* la taille de la maille du modèle, est également fortement contrainte par des études de sensibilité préalables (Bruneau *et al.*, 1995 ; **37**) ayant montré que des mailles de petite taille étaient seules pertinentes ; (iii) enfin, les outils de validation disponibles, mesures de débit à l'exutoire du bassin versant ou extension des zones saturées, sont très incomplets et permettent de conclure à des solutions optimales avec des jeux de paramètres très différents (Molénat, 1999).

III.3.1 Intérêt de la stratification pédologique

Pour spatialiser les propriétés retenues par *Topmodel*, on a cherché à utiliser une carte pédologique existante, permettant *a priori* de stratifier la couverture pédologique en des plages relativement homogènes, susceptibles d'être renseignées par des mesures complémentaires.

J'ai cherché à définir un niveau de stratification optimal, conciliant une variabilité intra-strate relativement faible et un nombre limité de strates à renseigner. Trois niveaux de stratification ont ainsi été comparés (Fig. 14) correspondant à un regroupement plus ou moins sévère (en 3, 12 ou 100 groupes) des unités cartographiques de la carte pédologique selon des critères de profondeur et d'hydromorphie des sols. Chaque strate est renseignée par des paramètres statistiques (moyenne, variance) de teneur en eau et transmissivité déduits de la description des sondages donnant la succession des horizons et de valeurs moyennes par type d'horizon issues de travaux antérieurs (Widiatmaka, 1994). Un échantillonnage de validation, construit selon une stratégie en grappes (**41**), a ensuite permis de tester ces différentes stratifications.

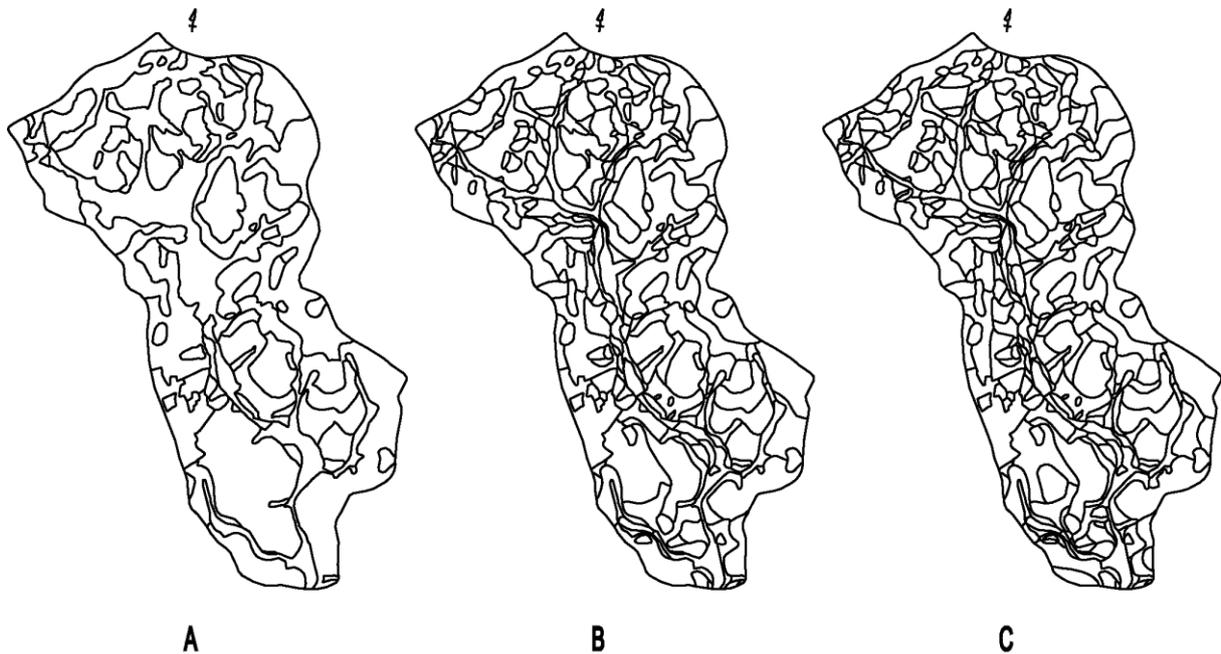


Figure 14 : Les plages élémentaires induites par la stratification des sols du bassin versant de Naizin en unités cartographiques (41). Trois niveaux de stratification sont considérés : A - trois groupes de sols ; B - douze sous-groupes ; C - 112 unités.

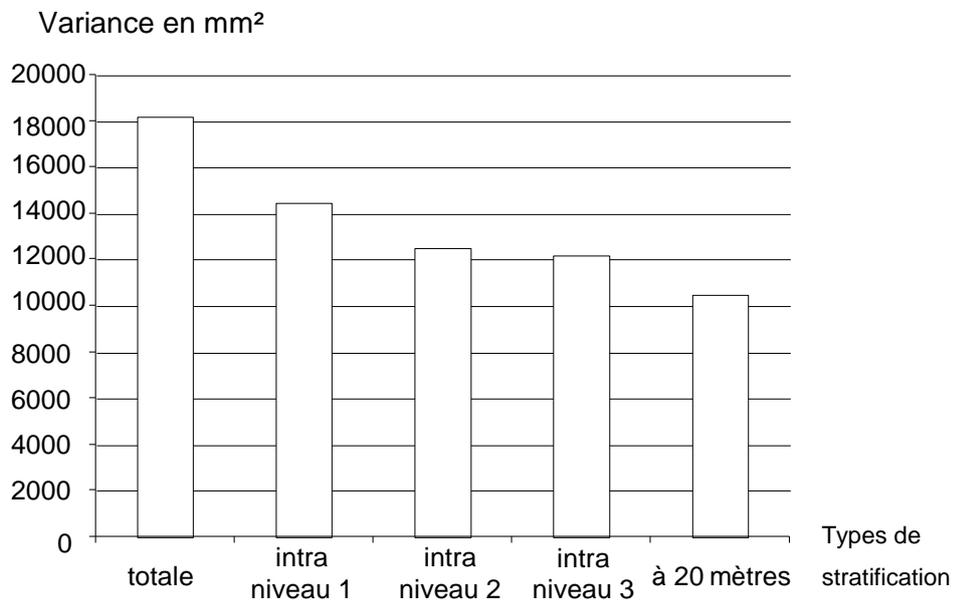


Figure 15 : Comparaison des variances intra-strates des 3 niveaux de stratification envisagés, à la variance totale et à celle entre des points distants de 20 m. (41)

Il est apparu clairement (Fig. 15) que la stratification la plus détaillée n'avait pas d'intérêt : ses nombreuses strates, coûteuses à renseigner, présentent une variabilité interne du même ordre que des strates moins nombreuses. Selon la sensibilité du modèle hydrologique à la variabilité intra-strate, on peut donc hésiter entre une stratification très simple en trois groupes, très intéressante en comparaison de la variabilité générale, et une stratification plus détaillée, en 12 groupes, induisant une réduction de variabilité supplémentaire mais plus difficile à renseigner.

Les raisons de cette incapacité de la stratification pédologique la plus fine à réduire de façon significative la variabilité des propriétés physiques sont de plusieurs ordres. D'une part, la variabilité des sols à courte distance (20 m) est du même ordre que celle observée au sein des plages de la stratification la plus détaillée (Fig. 15) et semble principalement liée aux variations rapides de la profondeur du sol. Une stratification détaillée n'est de ce fait efficace que si les strates sont délimitées avec une précision de l'ordre de la dizaine de mètres, ce qui n'est pas envisageable à partir de seules observations ponctuelles. L'autre raison dérive du fait que les données physiques ne sont pas mesurées en chaque point, mais sont inférées à partir de l'observation morphologique des sols et de l'application de données statistiques moyennes estimées pour chacun des horizons reconnus (Widiatmaka, 1994).

III.3.2 La notion de résolution spatiale pertinente

Ces travaux sur la pertinence de la stratification pédologique ont été menés en collaboration avec des hydrologues confrontés au choix d'une résolution spatiale optimale pour modéliser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant (Bruneau *et al.*, 1995 ; Mérot et Durand, 1998 ; **37**). Des études de sensibilité (Bruneau *et al.*, 1995) ont montré qu'une discrétisation de maille comprise entre 10 et 40 m était optimale pour modéliser le débit du bassin versant de Naizin (Morbihan).

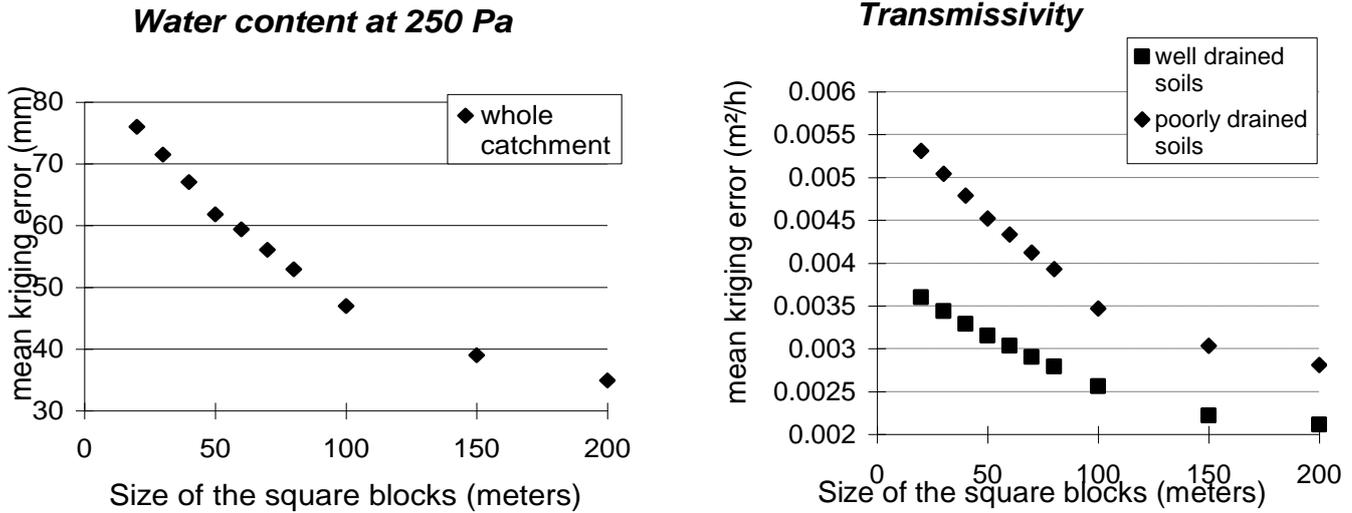


Figure 16: Evolution de l'erreur moyenne de krigeage pour la teneur en eau à 250 Pa et la transmissivité, en fonction de la taille des blocs d'estimation, en considérant les structures spatiales mises en évidence et les observations disponibles sur le bassin versant de Naizin (34)

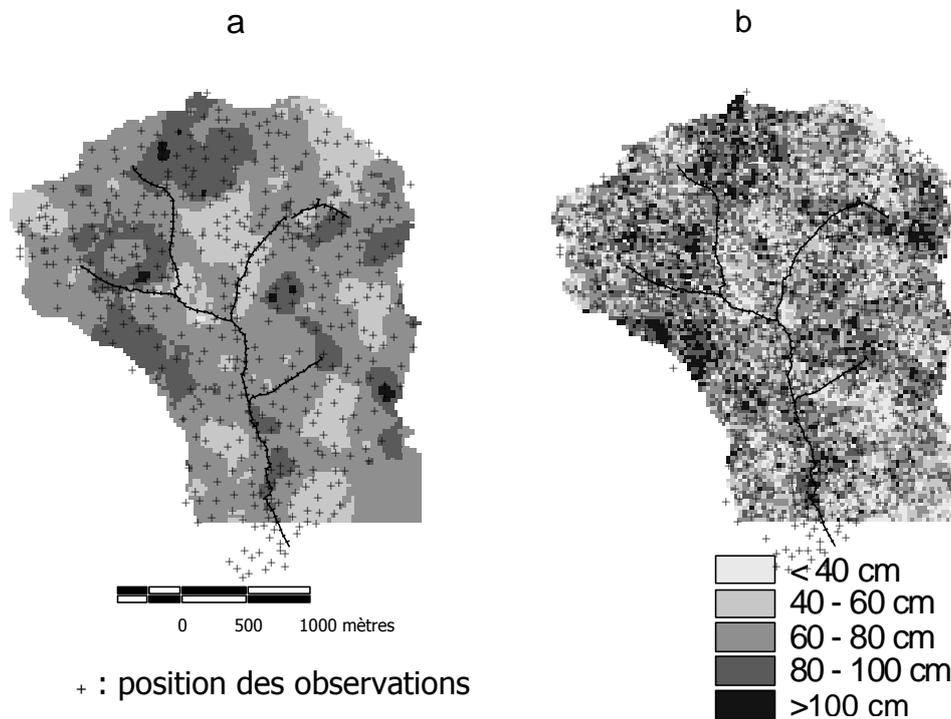


Figure 17 : Comparaison de cartes de la profondeur du sol du bassin versant de Naizin estimée par krigeage ordinaire (a) ou issue d'une simulation par une procédure dite de « recuit simulé » (Goovaerts, 1997) (b). Les structures spatiales considérées et les observations prises en compte sont identiques dans les deux cas (127).

Nous avons montré sur ce même bassin versant que ni une approche par stratification pédologique, ni une approche géostatistique ne permettaient d'estimer avec précision la valeur moyenne des propriétés physiques du sol en considérant des surfaces d'intégration aussi petites : les écarts-types d'estimation d'un krigeage-bloc portant sur des mailles de côté inférieur à 40 m sont en effet très élevés (Fig. 16) et montrent qu'une approche visant à estimer les propriétés du sol pour un maillage très fin, n'est pas pertinente.

Comment alors résoudre cette contradiction entre les exigences de la modélisation hydrologique, qui suppose une résolution élevée permettant seule de modéliser les flux dans le paysage, et notre incapacité à estimer les propriétés du sol à de telles résolutions ? Dans nos publications (**37**), nous proposons d'estimer les propriétés physiques du sol par leur moyenne (ou un autre paramètre de position) au sein de strates définies de façon assez grossières ou encore par krigeage sur des blocs de grande taille, puis d'appliquer ces estimations sur une grille plus fine. Cette méthode adapte la résolution spatiale aux performances de l'estimation spatiale qui sont dépendantes du milieu considéré et des données disponibles.

A la lumière de travaux récents (Beven, 1996 ; McBratney, 1998 ; Goovaerts, 1999) et de mon travail de recherche actuel, cette solution ne m'apparaît plus pleinement satisfaisante. D'une part, en ne considérant que des valeurs moyennes, on ne peut mettre en évidence l'effet de la variabilité spatiale à courte distance des sols ; or ces variations rapides ont des incidences sur les flux d'eau en favorisant les circulations préférentielles (Beven, 1996). D'autre part, cette solution ne tient pas assez compte de la finalité de la modélisation hydrologique qui n'est généralement pas de représenter les stocks et les flux d'eau en tout point d'un bassin versant, mais plutôt à l'échelle du bassin versant entier, cela pour évaluer les effets d'un aménagement comme par exemple les effets d'une modification du réseau de haies sur l'hydrologie d'un bassin (**16** ; Mérot, 1999).

Il semble donc plus intéressant dans ce contexte de restituer la structure spatiale des propriétés du sol que d'estimer leurs valeurs avec précision dans l'espace géographique. Les *techniques de simulation stochastique* (Goovaerts, 1997 ; Goovaerts, 2000) permettant de créer des champs spatiaux respectant une structure spatiale donnée, sont particulièrement adaptées à cet objectif. Elles supposent en effet un effort d'échantillonnage limité (de l'ordre de 50 à 100 points en première approximation) destiné à établir l'histogramme et le variogramme de la propriété considérée sur le bassin versant. Elles permettent ensuite de simuler, sans contrainte de résolution spatiale, une couverture pédologique « virtuelle » présentant des variations spatiales similaires à la couverture pédologique « réelle ». Ces

simulations peuvent être contraintes en tenant compte d'observations réelles ce qui permet de fixer la forme générale de la variation spatiale. A titre d'exemple, la figure 17 illustre ce genre de simulation en comparant une cartographie de la profondeur du sol du bassin versant de Naizin (Morbihan) établie par krigeage ordinaire à partir de 600 points à une simulation de cette même profondeur du sol tenant compte du variogramme établi sur les mêmes données : l'aspect lissé de la carte krigée est induit par le procédé de krigeage qui équivaut à un filtre de moyenne mobile dans ce cas de forte variabilité à courte distance et de faible échantillonnage ; par opposition, la carte obtenue par simulation stochastique respecte la structure spatiale effective mais aux dépens de l'estimation spatiale : la valeur estimée sur une maille donnée n'a que peu de signification, l'accent étant mis sur les corrélations spatiales entre mailles.

Par la suite, dans le cadre d'une procédure de type Monte-Carlo, le couplage du modèle hydrologique à diverses simulations de la couverture pédologique respectant toute la structure spatiale fixée, permettrait de quantifier la sensibilité du modèle hydrologique à la variabilité spatiale des sols. L'intérêt pratique d'une telle démarche consisterait à mieux évaluer les effets d'un aménagement supposé en quantifiant l'incertitude associée à la variabilité des sols.

III.3.3 Bilan - Perspectives

L'intégration des données pédologiques dans la démarche de modélisation hydrologique représente un enjeu important pour la science du sol, car elle permet de mieux replacer le rôle de la couverture pédologique dans les problèmes cruciaux de quantité et de qualité des ressources en eau.

Cette intégration se heurte à la difficulté d'estimer les propriétés du sol avec une résolution spatiale jugée optimale pour la modélisation hydrologique (une maille de 10 à 50 mètres). Nous avons montré que dans le cas des systèmes pédologiques du Massif armoricain, une stratification de la couverture pédologique en trois grands ensembles de sols, distingués par leur niveau général d'hydromorphie, était la plus pertinente si on considère l'effort d'échantillonnage requis et la variabilité résiduelle. Par ailleurs, les approches géostatistiques ne sont efficaces que pour des résolutions spatiales plus grossières (une maille de 100 à 200 m). Ainsi, les deux approches envisagées, stratification pédologique et estimation statistique, conduisent toutes deux à privilégier les variations spatiales de grande portée en lissant les variations locales.

De façon prospective, nous proposons de réintégrer ces variations locales dans la modélisation hydrologique par l'utilisation d'approches de simulation qui permettent de restituer la complexité des sols au sein d'un bassin versant sans avoir à multiplier les points d'observation. Cette approche semble adaptée dans les cas où l'on cherche à évaluer de façon globale le rôle du sol dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, sans s'intéresser avec précision aux chemins de l'eau.

III.4. Conclusion

A l'inverse de ma conclusion précédente sur l'insuffisance de la recherche métrologique en science du sol, des avancées considérables ont été obtenues ces dernières années en matière de prédiction et de modélisation spatiales des propriétés des sols. Les progrès les plus spectaculaires ont été d'ordre technologiques et ont concerné l'énorme accroissement de nos capacités à stocker l'information pédologique, à la représenter y compris en 3 dimensions, à la traiter statistiquement et à la croiser avec d'autres sources d'information plus facilement accessibles comme les images de télédétection et les modèles numériques de terrain. Les progrès ont été également importants sur le plan théorique, par exemple dans le domaine de la géostatistique pour laquelle nous avons déjà souligné les développements continus permettant de couvrir de nouveaux champs d'application (multivariable, qualitatif, non linéaire,...), mais également en matière de modélisation (approches par logique floue, analyse de la propagation des erreurs, simulation stochastique). D'autres techniques nouvelles ont été introduites comme les fractales pour analyser ou simuler l'hétérogénéité structurale des sols (Rieu et Sposito, 1991), les réseaux neuronaux pour améliorer la prédiction spatiale des sols ou encore l'utilisation des arbres de régression pour relier la variabilité des sols à des déterminants supposés (Lagacherie, 1992). L'analyse spatiale des sols dispose à présent d'une palette très vaste d'outils dont nous avons cherché à présenter l'état de l'art lors du symposium « Progrès réalisés en cartographie des sols à l'aide d'outils modernes ; méthodes et résultats » que j'ai co-animé à l'occasion du congrès mondial de science du sol de Montpellier et d'un numéro spécial de *Geoderma* (**38, 59**, McBratney *et al.*, 2000).

Types d'évolution	Cibles menacées	Risque environnemental	Origines de l'évolution	Voies de remédiation
Accumulation de phosphore dans les sols	Eau	Pertes par ruissellement voire lessivage Eutrophisation	Fertilisation non raisonnée – apports d'effluents	Réduction des apports – protection des cours d'eau
Contamination des sols par les éléments traces	Plante Santé humaine	Phytotoxicité Introduction dans la chaîne alimentaire	Apports d'effluents agricoles et urbains	Contrôle des apports – Chaulage
Baisse des teneurs en matière organique	Sol Eau Air	Baisse de stabilité structurale et de l'activité biologique Effet sur le cycle de l'azote Emissions de CO2	Baisse des restitutions humiques Travail du sol profond	Apports d'amendements organiques Travail du sol simplifié Modifications des assolements
Compaction du sol	Plante Sol Eau Air	Enracinement médiocre Ruissellement et érosion Réduction de l'activité biologique	Travail du sol Baisse de la stabilité structurale	Maintien du statut organique Amélioration du travail du sol
Baisse de l'activité biologique (biomasse microbienne et macrofaune)	Sol Plante Eau	Compaction du sol Effets sur les cycles biogéochimiques	Dégradation des facteurs mésologiques Travail du sol Produits phytosanitaires	Maintien de la qualité physique et chimique des sols Baisse de l'écotoxicité des produits Amendements organiques Agriculture biologique
Acidification	Sol Eau Plante	Toxicité aluminique Solubilisation de métaux	Faible pouvoir tampon des sols Apports d'effluents organiques	Chaulage

Tableau 5 : Types de dégradation de la qualité des sols envisagés dans le contexte des sols limoneux acides du Massif armoricain

IV. PERSPECTIVES : LA NOTION DE QUALITE DES SOLS ET SA SURVEILLANCE A L'ECHELLE D'UNE REGION

IV.1. Introduction

Ce chapitre dresse mes perspectives de recherche en matière d'analyse spatiale des sols. Celles-ci se fondent sur une réorientation de mes propres travaux et de façon plus générale de ceux de l'équipe de recherche « qualité des sols et des eaux » de l'UMR SAS, vers le thème de l'impact des agrosystèmes sur la qualité des sols, en particulier d'ordre physique et biologique.

L'intensification des pratiques agricoles s'est d'abord manifestée sur le plan environnemental par une dégradation de la qualité de l'eau (nitrates, phosphore, pesticides...). Ce constat nous a conduit à orienter en premier lieu nos recherches sur le rôle du sol et de son organisation spatiale sur les transferts d'eau et de polluants. Les travaux menés dans le cadre des programmes CORMORAN, sur l'intégration de données sol dans les modèles hydrologiques ou TYFON, sur l'organisation spatiale des sols hydromorphes de fonds de vallée, s'inscrivaient pleinement dans cet objectif. Cette intégration du sol dans les modèles spatiaux et temporels du transfert des polluants dans les bassins versants va rester un objectif central de l'équipe rennaise et je continuerai à m'y intéresser.

Néanmoins, l'intensification a également un impact sur la qualité intrinsèque des sols. Celui-ci est *a priori* beaucoup moins spectaculaire que pour la ressource en eau, en particulier dans le Massif armoricain, en raison notamment de la discrétion de ses manifestations externes : peu d'impacts sur les rendements des cultures ; pas de manifestation importantes d'érosion ; des indicateurs chimiques classiques qui restent stables (pH), s'améliorent (levée des carences en P, K, ...) ou restent favorables par rapport aux normes classiques d'interprétation (teneur en matière organique).

L'identification d'une dégradation de la qualité des sols ne se manifeste donc généralement que par comparaison avec des données anciennes (rarement fiables) ou en projetant à moyen terme les évolutions observées actuellement : c'est le cas pour les problèmes d'accumulation en phosphore, de contamination par des éléments traces ou de baisse des teneurs en matière organique (Tab. 5).

<i>Echelle temporelle</i>						<i>Echelle spatiale</i>					
Millénaire	Siècle	Décennie	Année	Décade	Jour	Local (~400 m ²)	Parcelle (~2-3 ha)	Versant (gradient d'hydromorphie)	Exploitation agricole (entre parcelles)	Petite région (entre exploitations)	Région (entre substrats, entre systèmes)
+						Profondeur du sol	+				+
	+	+				Epaisseur de l'horizon A		+		+	
			+	+		Humidité du sol		+	+		+
			+		+	Température du sol		+	+		+
	+	+				Teneur en matière organique		+		+	+
		+	+	+		Structure de l'horizon de surface	+		+	+	
		+	+			pH	+			+	+
		+	+			Teneur en phosphore		+		+	+
	+	+				Teneur en éléments-traces	?		+	+	
		+	+	+		Biomasse microbienne	?	?	+	+	?
		+		+		Vers de terre	+	+	+	+	

Tableau 6 : Essai d'identification des échelles spatiales et temporelles pertinentes pour décrire la variabilité spatio-temporelle de différentes propriétés du sol dans le contexte du Massif armoricain.

Des comportements observés dans des situations extrêmes ou mis en évidence dans des études expérimentales constituent une seconde voie d'identification d'une dégradation de la qualité des sols (Tab. 5) : compaction des sols dans les zones légumières ; constat d'une abondance moindre de la macrofaune du sol en cas de compaction (Binet *et al.*, 1996) ; faiblesse de la biomasse microbienne pour certains types de rotations ou de pratiques culturales.

In fine, les types de dégradation de la qualité des sols qu'il faut considérer dans notre contexte régional (Tab. 5) restent encore assez mal documentés quant à leur occurrence et à leur évolution dans le temps. Néanmoins, les indices d'une évolution jugée globalement défavorable se multiplient ; l'étude de l'impact des agrosystèmes sur la qualité des sols est de ce fait indispensable dans une optique de durabilité des systèmes de production agricole. Cette étude présente des difficultés spécifiques qui sont principalement de deux types :

a) l'identification des indicateurs de qualité des sols

Si la gamme des indicateurs chimiques de la qualité des sols semble assez complète, même si de façon récurrente la question de leur signification exacte est posée, en revanche l'identification d'indicateurs physiques et biologiques des sols reste en grande partie du domaine de la recherche. Des questions restent ouvertes à tous les niveaux de leur mise au point : signification par rapport aux processus en jeu ; échantillonnage (mode, densité, période) ; interprétation des résultats ; normalisation et analyse en routine.

Ce constat est tellement fort qu'aucun critère de qualité physique ou biologique des sols n'a été retenu dans le nouveau programme de surveillance de la qualité des sols initié au niveau national.

b) la multiplicité des échelles d'espace et de temps

Le tableau 6 identifie dans le contexte du Massif armoricain les principales échelles spatiales et temporelles qui me semblent pertinentes pour analyser la variabilité spatio-temporelle de propriétés choisies des sols.

Dans l'espace, il envisage des domaines de dimension croissante, depuis le niveau local de l'ordre de quelques ares jusqu'à l'échelle régionale ; il repère, à partir d'études publiées et de ma propre expérience, les deux ou trois structures spatiales qui semblent prédominantes pour chaque propriété. A titre d'exemple, pour la profondeur du sol, l'ensemble des variogrammes dont je dispose montre une variabilité très élevée à très courte distance, d'où le choix de l'échelle locale ; un autre facteur prédominant me semble être la distribution régionale des substrats qui conduit à des sols plus ou moins épais. Dans le temps, on

envisage les variations temporelles depuis des variations journalières jusqu'au millénaire. Pour la profondeur du sol, les variations sont de façon générale faible pour un pas temps inférieur au millénaire.

Bien que critiquable dans le détail, une telle présentation montre la diversité des échelles spatiales et temporelles qui sous-tendent la variabilité des propriétés des sols selon les processus considérés. On perçoit de ce fait aisément que la conception de réseaux de mesure de la surveillance des sols n'est pas aisée, d'autant plus qu'on ne dispose pas de sites intégrateurs de la variabilité spatiale¹, à l'image des mesures faites à l'exutoire d'un bassin versant pour évaluer la ressource en eau.

Malgré les différences observées, plusieurs enseignements me semblent pouvoir être tirés de ce tableau : (i) la variabilité locale est généralement forte et doit être considérée ; dans le cas des mesures chimiques, cette variabilité est généralement lissée par la prise d'échantillons composites constitués de plusieurs prélèvements ; cette technique au demeurant très critiquable n'est plus applicable pour des propriétés physiques (densité, conductivité...) ou décrivant la macrofaune du sol. Des études de stratégie d'échantillonnage sont donc indispensables à mener pour résoudre ce point délicat ; (ii) la diversité à l'échelle de la petite région ou de la région est toujours grande, ce qui conduit à prévoir des dispositifs intégrant la variabilité liée aux changements de systèmes de production agricoles et de substrat ; (iii) pour les types de dégradation envisagés (Tab. 5), les évolutions me semblent devoir être prédites sur une base de modélisation annuelle à échéance de quelques décennies.

IV.2. Les questions posées : vers une approche prédictive de l'évolution de la qualité des sols

L'idée générale est de disposer d'outils permettant d'évaluer l'évolution de la qualité des sols au cours du temps sous l'effet des pratiques agricole aussi bien à l'échelle de la parcelle qu'à celle d'une région. Il s'agit également d'avoir une approche non plus

¹*Les dépôts d'érosion en bas de pente et en aval des bassins versants ou encore les matières en suspension dans le réseau hydrographique pourraient être considérés comme de tels sites intégrateurs. Peu de travaux (Thomas et al., 1999a) ont à ma connaissance testé cette approche qui ne semble pas applicable dans des contextes pédologiques à faible érosion et dont l'interprétation apparaît de façon générale difficile en raison des transformations potentielles des particules au cours de leur transport.*

uniquement descriptive ou explicative d'évolutions passées, mais également prédictive permettant d'évaluer les impacts sur les sols de changements à venir.

Quatre questions de recherche m'apparaissent fondamentales pour tendre vers une approche prédictive de l'évolution de la qualité des sols dans notre contexte d'étude :

1. quels indicateurs retenir pour caractériser la qualité physique et biologique des sols limoneux acides ?
2. quel type de réseau de surveillance faut-il mettre en place pour déceler une éventuelle dégradation de la qualité des sols ?
3. comment modéliser l'évolution temporelle des propriétés des sols à l'échelle locale, mais également à l'échelle d'un paysage, pour évaluer l'évolution globale de la ressource en sol ?
4. peut-on, à partir de tels modèles, prévoir les incidences d'un changement de pratiques culturales (par exemple, la signification du travail du sol, le passage à l'agriculture biologique) sur la qualité des sols et leur variabilité spatiale ?

IV.3. Des pistes de recherche actuelles

Les questions précédentes dépassent l'activité de recherche d'une seule équipe et sont d'actualité pour l'ensemble de la communauté scientifique de Science du Sol (Bouma *et al.*, 1999). Nous commençons à les aborder dans un projet intitulé « Caractérisation, déterminisme spatial et surveillance de la qualité des sols cultivés en milieu acide » que j'anime avec P. Curmi dans le cadre de l'appel d'Offre GESSOL du Ministère de l'Environnement (coll. INRA de microbiologie de Dijon ; UMR Ecobio de l'Université de Rennes 1). Quelques pistes de recherche incluses dans ce programme ou le prolongeant sont à présent proposées.

IV.3.1 La définition d'indicateurs physiques et biologiques de qualité des sols

Cette définition est d'abord le fait de spécialistes de physique du sol (V. Hallaire ; M. Lamandé) et de biologie du sol (D. Cluzeau et G. Perez, Université de Rennes 1 ; R. Chaussod et C. Hénault de l'INRA Dijon).

Une première action de recherche (thèse de G. Perez, Université de Rennes 1) vise à évaluer *in situ* l'état microbiologique des sols en liaison avec les caractéristiques physiques, chimiques, pédologiques du sol et les éventuels retours de matière organique. Ce travail est

fondé sur le couplage d'une caractérisation quantitative et qualitative du peuplement lombricien et d'une description *in situ* ou par tomographie sur gros blocs non remaniés, de la porosité d'origine lombricienne.

Sur des parcelles généralement communes au travail précédent, le travail de thèse de M. Lamandé (UMR SAS, Rennes) cherche à relier les paramètres hydriques (paramètres de transfert et de rétention) des sols à leurs caractéristiques morphologiques (paramètres d'organisation de la porosité et de la phase solide). L'étude compare des parcelles présentant des rotations culturales différentes et s'attache à évaluer les modifications saisonnières des paramètres physiques et morphologiques étudiés.

Une troisième action vise à proposer des indicateurs microbiologiques des sols en se focalisant sur la taille de la biomasse microbienne et sur les activités de dénitrification. Une première campagne portant sur la caractérisation de la biomasse microbienne (G. Jarrige, INRA Dijon – UMR SAS) et sur la capacité des sols à émettre N₂O au cours de la dénitrification (C. Hénault, INRA Dijon), menée sur une vingtaine de parcelles, a permis d'identifier une grande variabilité du fonctionnement microbiologique des sols (effets lieu, effet hydromorphie).

Je m'intéresse particulièrement aux conditions d'estimation au champ des indicateurs potentiels et à leur variabilité intra-parcellaire. Ces indicateurs supposent pour certains des mesures relativement lourdes à mettre en œuvre, devant être conduites sur des échantillons non remaniés et dont la variabilité spatiale à courte distance est mal connue. Un travail récent (DEA de C. Ferrand, 2001) analyse la variabilité spatiale de propriétés physiques (infiltrabilité, densité apparente) et biologiques (activité lombricienne) à l'échelle d'une parcelle de 4 ha. La variabilité à courte distance (5 m) est comparée à une variabilité plus globale et une approche par stratification topographique est confrontée à un échantillonnage systématique de la parcelle. Il s'agit là d'un travail tout à fait classique pour des propriétés morphologiques et/ou chimiques des sols mais novateur dans le cadre d'une approche couplée de physique et biologie des sols, les références dans ce domaine étant peu nombreuses (Cannavacciuolo, 1998).

Ainsi, pour des aspects de qualité physique et biologique des sols, un effort de recherche métrologique est requis au niveau de la mise au point des indicateurs avant même de pouvoir les intégrer dans des réseaux de surveillance.

IV.3.2 La constitution de réseaux de surveillance et de bases de données diachroniques

Peu de données existent à l'heure actuelle en France permettant d'évaluer l'évolution des propriétés des sols cultivés sous l'effet de l'activité humaine, en dépit du lancement dès les années 1980 d'un programme tout à fait pionnier, l'Observatoire de la Qualité des Sols. Mais ce programme s'est focalisé sur l'étude de quelques sites et n'a pas su, contrairement au programme développé de façon parallèle sous forêt (RENECOFOR), mettre en place un réseau permettant d'évaluer l'étendue spatiale des changements mis en évidence au niveau local.

Les analyses de terre réalisées dans des laboratoires agréés utilisant les mêmes méthodes de mesure, sont une source d'information *a priori* facile d'accès et disponible sur l'ensemble du territoire national, permettant de détecter des évolutions temporelles par comparaison de jeux de données couvrant des périodes différentes. Nous avons déjà testé cette possibilité en Bretagne en comparant des statistiques communales établies sur les périodes 1980-84 et 1990-95 : nous avons alors montré, en posant néanmoins des hypothèses fortes sur l'échantillonnage au sein de la commune, que des évolutions significatives (baisse des teneurs en matière organique, hausse des teneurs en phosphore) pouvaient être mises en évidence pour de nombreuses communes de cette région (Cf. § II.1).

Une comparaison analogue va être entreprise à l'échelle nationale dans le cadre du programme national BDAT «Base nationale D'Analyses de Terre» à présent coordonné par l'unité « INFOSOL » de l'INRA nouvellement créée à Orléans. La comparaison diachronique (coll. INRA Infosol Orléans ; ISA Lille) va porter dans un premier temps sur des données acquises au niveau national entre 1990-1995, que j'avais déjà traitées, et 1995-2000 dont l'archivage est en cours. Par la suite, des conventions établies avec les laboratoires d'analyses de terre vont permettre une intégration régulière, tous les deux ans, de leurs résultats analytiques dans la base de données nationale. Nous disposerons ainsi en continu d'indicateurs statistiques, qu'il faudra manier avec précaution car l'échantillonnage n'aura pas été maîtrisé, décrivant l'évolution par canton de propriétés essentiellement chimiques des sols.

Ces synthèses d'analyse de terre ne sont néanmoins pas suffisantes pour un suivi temporel de l'évolution des sols : l'échantillonnage non maîtrisé est susceptible d'introduire des biais empêchant la détection fiable d'évolutions temporelles qui sont généralement de

faibles amplitudes en regard des variations spatiales. Des réseaux spécifiques de suivi de la qualité des sols sont de ce fait mis en place, la base nationale de ce réseau étant en cours d'établissement par l'unité INFOSOL d'Orléans, aux nœuds d'un quadrillage systématique de 16 km de côté (réseau RMQS : réseau de Mesure de la Qualité des Sols)(Arrouays *et al.*, 2000). De l'ordre de 2000 sites, correspondant à des placettes de la taille d'un are, seront suivis avec un pas de temps de l'ordre de 5 ans pour des indicateurs là encore essentiellement chimiques.

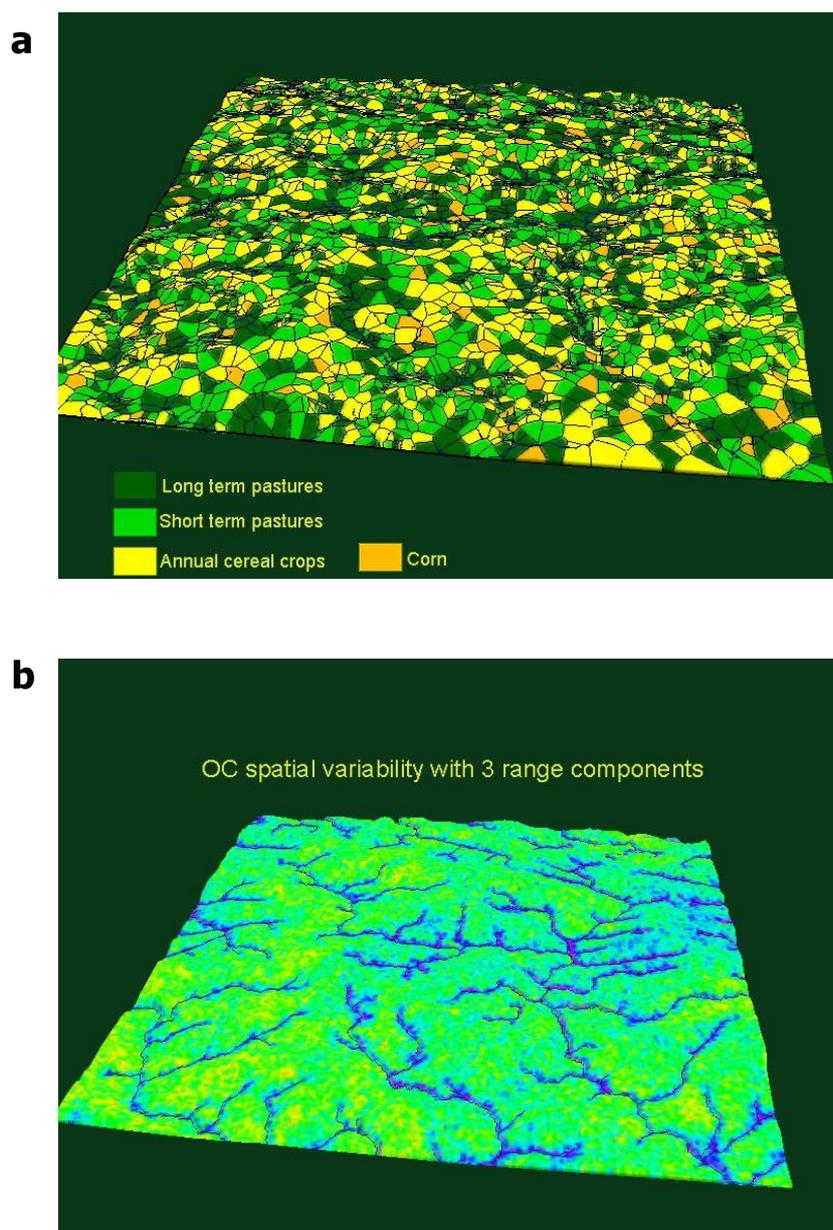


Figure 18 : Exemples de simulation spatiale à l'échelle d'un paysage agricole : a. Parcelle virtuelle ; b. Teneurs en matière organique des sols intégrant trois composantes spatiales de variabilité (29, 53)

Si on ajoute à ces deux dispositifs la mise en place prévue de sites dits « lourds » ou qualifiés « d'observatoires de recherche », destinés à analyser plus finement les processus et les interactions avec les autres compartiments des écosystèmes, on perçoit que l'information disponible à moyen terme sur l'évolution des sols, sera infiniment plus riche que celle accessible actuellement. Cette information n'en demeurera pas moins incomplète, très peu de données biologiques ou physiques étant pour l'heure incluses dans la liste des indicateurs retenus. De plus, la densité d'échantillonnage induite par ces différents dispositifs restera faible, de l'ordre d'une analyse pour 50 à 300 ha pour la BDAT et un site pour 25 600 hectares pour le réseau RMQS.

La question de l'aptitude de ces différents réseaux de mesure à détecter les évolutions effectives de la couverture pédologique reste donc posée, comme elle l'est dans d'autres pays ayant des dispositifs de surveillance plus anciens (Mol *et al.*, 1998). A côté des méthodes purement statistiques (constitution d'un jeu de données indépendant) qui pourraient être mises en évidence pour tester ces réseaux, il me semble qu'une voie plus prometteuse est de les confronter à des évolutions simulées et de voir dans quelle mesure ils sont capables de valider celles-ci. Cela rejoint des travaux visant à modéliser dans l'espace et dans le temps des propriétés des sols développés dans la partie suivante.

IV.3.3 La modélisation spatio-temporelle de propriétés du sol

La variabilité spatiale ou temporelle de propriétés des sols a fait l'objet de très nombreux travaux que ce soit par des approches expérimentales ou par modélisation, mais **les études combinant ces deux dimensions restent peu nombreuses** (Hyriakidis et Journal, 1999 ; Papritz et Webster, 1995). Celles qui le font négligent généralement la variabilité à courte ou moyenne distance pour ne considérer que les grandes tendances. De ce fait, l'impact d'un changement de pratiques culturales ou d'un aménagement du territoire ne peut être correctement évalué à la fois à l'échelle de la parcelle agricole et à celle du territoire. De plus, la définition de stratégies d'échantillonnage pour surveiller l'évolution de la qualité des sols ne peut pas être testée quant à leur aptitude à détecter de façon non biaisée l'évolution des sols d'une région.

Ce constat m'amène à développer, en collaboration avec le Pr. A. McBratney (Université de Sydney, Australie), une approche simulant l'évolution d'une propriété du sol au cours du temps en intégrant différentes échelles de variation spatiale ; les exemples de propriétés du sol considérées ont été dans un premier temps la matière organique des sols (**32, 67**) et dans un second temps leur teneur en phosphore (Chauvet, 2000).

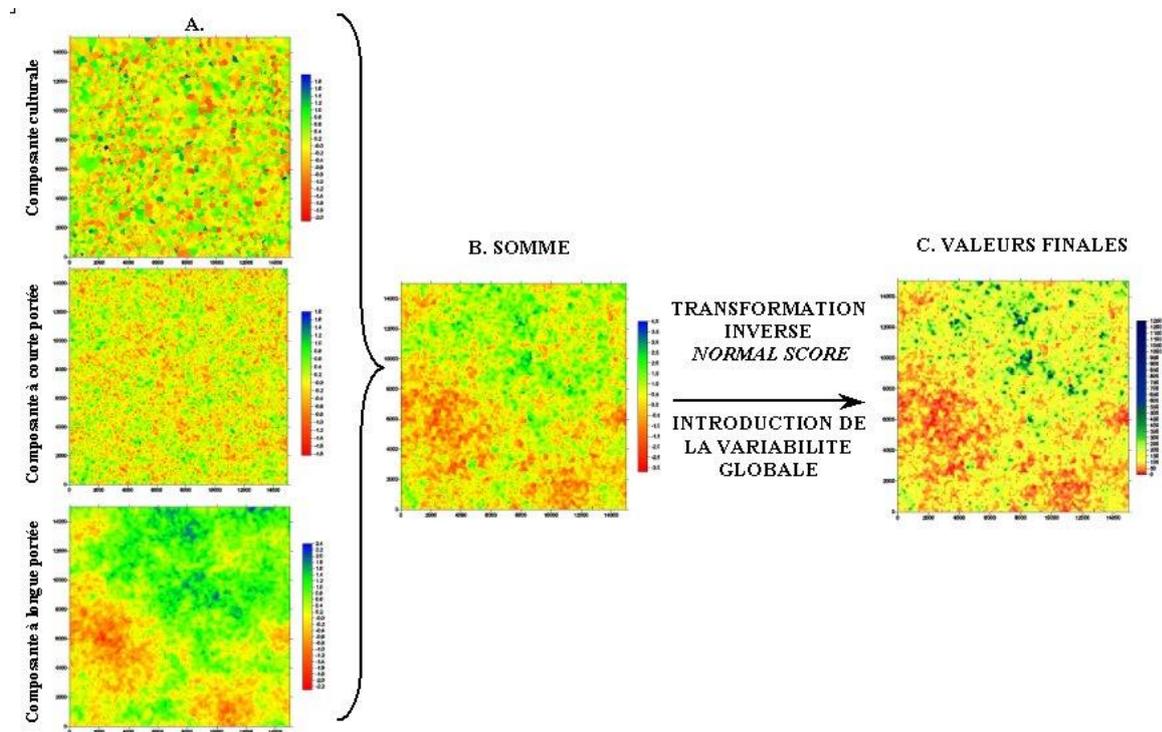


Figure 19 : Représentation cartographique des différentes étapes d'une simulation des teneurs en phosphore à 3 composantes spatiales de variabilité (Chauvet, 2000).

Ces travaux sont en cours de publication et je me limiterai de ce fait à donner la trame générale de la démarche et à évoquer les perspectives ouvertes.

a) Méthodologie

L'idée de base de ces études est de **simuler un paysage virtuel présentant des structures spatiales d'une propriété** choisie du sol, qui soient similaires à celles que l'on peut décrire dans la réalité. On fait ensuite évoluer ce paysage virtuel au cours du temps (quelques décennies) selon différents scénarios et on observe l'évolution des structures spatiales par des indicateurs statistiques. Ce paysage virtuel est ensuite échantillonné selon différentes stratégies et celles-ci sont évaluées selon leur aptitude à décrire l'évolution générale du paysage virtuel. Les figures 18 et 19 illustrent les différentes étapes d'une telle démarche (32, Chauvet, 2000).

De façon concrète, on a considéré un secteur de 15 km x 15 km que l'on a représenté par 90600 pixels de 50 m x 50 m (Fig. 18). On a cherché à simuler sur ce secteur un « paysage agricole » présentant certaines caractéristiques (parcellaire, occupation du sol, successions culturales) fixées en fonction du contexte agricole retenu.

En premier lieu, un algorithme dit de « variance quad-tree » appliqué à la topographie (McBratney *et al.*, 1999) a permis de définir de l'ordre de 4000 parcelles, d'une superficie moyenne fixée à 4 ha et variant de 0.5 à 10 ha, les parcelles les plus petites étant situées de façon préférentielle dans les secteurs avec une topographie la plus variable. Une occupation du sol initiale est ensuite attribuée à chaque parcelle (Fig. 18.a) ; cette occupation du sol est susceptible d'évoluer chaque année selon une matrice de transition fixée par le scénario d'évolution choisi.

La simulation stochastique (Goovaerts, 1997) et des analyses de régression permettent ensuite de simuler dans l'espace la propriété du sol en respectant des structures spatiales connues (Fig. 18.b et 19) : (i) une composante de courte distance (variabilité intra-parcellaire) fixée en se fondant sur les variogrammes publiés dans des études de terrain antérieures ; (ii) une composante de moyenne distance attribuée à des variations de teneur en matière organique selon l'hydromorphie des sols et modélisée par un indice topographique d'hydromorphie (Chaplot, 1998) ; (iii) une composante de longue portée (composante régionale) correspondant à des changements de substrat ou des gradients climatiques. Ces différentes composantes sont ensuite combinées en supposant un modèle additif simple de régionalisation.

Figure 20 : Représentation de l'évolution simulée au cours du temps de la teneur moyenne en matière organique d'un paysage agricole et des enveloppes d'incertitude associées à différentes stratégies d'échantillonnage (Walter et al., à paraître).

L'évolution annuelle est par la suite estimée pour une période de 50 ans en chacun des pixels élémentaires. Le modèle de Hénin-Dupuis (1945) a été retenu dans un premier temps : ce modèle simple est basé sur un bilan entre le taux d'humification des entrées annuelles de matière organique fraîche, qui sont fonction de l'occupation du sol, et la minéralisation de la matière organique humifiée, qui dépend du taux de carbone initial. L'influence de l'engorgement en eau sur le taux de minéralisation a également été considéré.

Enfin, différentes stratégies d'échantillonnage (par grille systématique, par transects, stratifiée par l'occupation du sol initiale, stratifiée par l'occupation du sol actuelle, stratifiée par la topographie, ...) ont été testées (Fig. 20) en comparant les évolutions de teneurs en matière organique prédites par un dispositif d'échantillonnage donné à celles effectives au sein du paysage simulé. L'incertitude induite par l'installation d'un procédé d'échantillonnage donné peut être estimée par une procédure de type *Monte-Carlo* en répétant 30 fois la simulation d'un même dispositif.

b) Perspectives

Nous disposons à présent d'outils méthodologiques (simulation stochastique, modélisation déterministe, outils statistiques) et d'une puissance de calcul suffisante pour combiner différentes échelles spatiales et de les faire évoluer au cours du temps. Nous tendons de ce fait vers le développement de modélisations spatio-temporelles d'un paysage qui intègrent beaucoup mieux la diversité des processus réellement en jeu. Ce type d'approche est en plein essor comme le montre le choix d'un symposium « Landscape scale research: methodology, concepts and consequences for soil and water quality » lors du prochain congrès mondial de Science du Sol. Ces travaux tendent à combler le retard pris par la science du sol en matière de modélisation spatio-temporelle par rapport à d'autres disciplines comme l'hydrologie, l'écologie du paysage, ou la dynamique des populations.

L'originalité de notre approche tient en premier lieu dans le choix d'un secteur géographique virtuel qui ne soit pas la copie d'une réalité physique particulière : des outils de simulation des différentes composantes d'un paysage agricole ont de ce fait été développés, ce qui permet justement de modifier l'une ou l'autre d'entre elles pour tester l'effet d'un contexte initial particulier, d'une évolution différente... Ce choix permet également d'intégrer simplement des connaissances préexistantes sur les structures spatiales des sols qui seraient difficiles à acquérir sur un même site. En second lieu, notre approche considère plusieurs pixels au sein d'une même parcelle et intègre de ce fait la variabilité intra-parcellaire : ces pixels peuvent être gérés de façon similaire si on considère que les pratiques agricoles sont uniformes au sein d'une parcelle agricole donnée ; ils peuvent également être

gérés de façon individuelle ce qui va nous permettre d'évaluer les conséquences d'une stratégie de type agriculture de précision cherchant à moduler les pratiques et les intrants en fonction des conditions locales.

Les **difficultés méthodologiques** à résoudre sont également plus clairement perçues suite aux premiers travaux menés.

La première d'entre elles tient à **la définition d'un état initial du système** : celui-ci est fixé en simulant de façon indépendante les différentes composantes d'un paysage (les parcelles, l'occupation du sol, les sols) ; or, ce procédé peut conduire à des situations extrêmes qui se traduisent par des évolutions très fortes au cours des premières années de la simulation. Il faut donc définir de façon plus intégrée les différentes étapes de l'état initial ou dédier les années initiales de la modélisation à l'équilibrage du système.

La difficulté principale est néanmoins d'ordre plus général : elle tient aux **lacunes en matière de modélisation des impacts sur les sols d'une contrainte extérieure**. Si en première approximation, on peut considérer que de tels modèles existent pour prévoir l'évolution des stocks et des flux pour des espèces chimiques dans les sols, il n'en est pas de même pour l'évolution des états physiques du sol et surtout pour les caractéristiques biologiques des sols (Smith *et al.*, 1998 ; Lavelle, 2000). Nous sommes donc susceptibles de mettre en oeuvre des modèles prédictifs de l'évolution de teneurs dans les sols (teneur en matière organique, nutriments, éléments-traces), mais cette démarche semble trop précoce pour les aspects de qualité physique ou biologique des sols. Une démarche de modélisation intégrée tenant compte des interactions dans le sol entre les conditions physiques, chimiques et biologiques ne peut donc pas encore être envisagée.

Ainsi, il nous faut veiller, en l'absence d'une connaissance complète des processus, à continuer à développer des réseaux de mesure permettant d'évaluer de façon non biaisée l'évolution effective des propriétés des sols dans les paysages. Nous retrouvons le dilemme qui s'offre sans cesse au spécialiste de l'analyse spatiale des sols : modéliser pour généraliser et étendre des mesures ponctuelles souvent coûteuses et à la représentativité parfois douteuse ; mesurer pour combler notre méconnaissance des processus ou notre incapacité à les modéliser. Il me semble que dans l'état actuel des recherches, seules des approches combinant la mesure directe et la modélisation sont susceptibles d'accroître nos connaissances mais également d'assurer une gestion raisonnée de la ressource en sol.

V. CONCLUSION GENERALE

La variabilité spatiale des sols est souvent perçue comme une contrainte à laquelle il faut s'adapter ou au contraire qu'on peut tenter de réduire par des aménagements ou des amendements (Sebillotte, 1989). En matière de production végétale par exemple, les développements récents de l'agriculture de précision visant à adapter très finement les itinéraires techniques aux conditions locales, sont essentiellement conçus dans une optique d'uniformisation du milieu, par exemple en apportant des doses modulées de fertilisants lissant l'hétérogénéité initiale des teneurs dans le sol. Cette tendance à vouloir réduire la diversité spatiale des sols n'est pas inféodée à une vision « productiviste » de l'activité agricole ; elle peut également s'inscrire dans une optique environnementale, par exemple de protection de la ressource en eau. En effet, dans un milieu fortement variable et de ce fait difficile à maîtriser, les risques de fuites de polluants sont généralement plus élevés que dans un milieu globalement homogène et dans lequel les techniques sont plus faciles à ajuster à l'état du milieu ou aux besoins des cultures. De même, quand on cherche à optimiser les capacités épuratoires de fonds de vallée, il apparaît très vite que la variabilité spatiale des milieux limite l'efficacité de certains processus physico-chimiques, par exemple la dénitrification (Brix, 1994 ; Bidois, 1999) et que l'optimisation de ce type de procédé supposerait des aménagements visant à réguler et homogénéiser le fonctionnement hydrologique de ces zones.

A l'opposé, la variabilité spatiale des sols peut également être perçue comme un attribut très positif d'un paysage. Les arguments en sa faveur sont de plusieurs ordres. La variabilité des sols permet en premier lieu une diversité des productions végétales qui ont des exigences différentes en matière de conditions optimales de croissance. Elle peut contribuer ensuite au maintien de la biodiversité de la faune et de la flore dans le paysage, mais également parmi les microorganismes et de la macrofaune du sol (Chaussod, 1996 ; Lavelle, 2000). On peut également considérer qu'elle accroît la robustesse des écosystèmes et en particulier leur aptitude à résister aux aléas climatiques : pour reprendre notre exemple des fonds de vallée, disposer au sein d'un même système de zones oxydées et réduites limite l'efficacité globale des seuls processus physico-chimiques mais permet une assimilation biologique de l'azote par les plantes.

J'ajouterai un argument d'ordre pédagogique à cet intérêt de la diversité des sols : il s'agit de la possibilité d'intéresser le public au sol en jouant sur les différences morphologiques très nettes que l'on peut observer d'un point à l'autre, le long d'un versant

ou au sein d'une même parcelle. Enseignant depuis quinze ans la science du sol, je suis convaincu que la démarche la plus efficace pour introduire les constituants ou la formation des sols, mais également leur fonctionnement et leur rôle dans la production agricole ou la préservation de l'environnement, part d'une comparaison *in situ* de sols à différents endroits d'un paysage. Dans le même ordre d'idée, je suis toujours frappé de constater que les agriculteurs les plus attentifs à une bonne gestion de leurs terres sont ceux qui disposent de parcelles avec des sols très variables.

On peut ainsi vouloir accorder une valeur particulière à la variabilité spatiale des sols ; le concept de *pédodiversité* introduit par Ibanez *et al.* (1995) est une proposition dans ce sens, qui transpose aux sols la notion de biodiversité en reprenant le même type de critères descriptifs (abondance, richesse spécifique, modèles de distribution spatiale) et en cherchant à classer les milieux selon ces critères. Même si je suis sensible à l'ambition affichée qui est de mettre en avant l'importance de l'organisation spatiale des sols dans un paysage, l'application du concept d'espèce aux sols m'apparaît peu pertinent. Il me semble plus intéressant d'essayer de quantifier cette pédodiversité par un ensemble d'indicateurs reliés aux propriétés morphologiques, physiques, chimiques et biologiques des sols. L'enjeu est bien d'arriver à relier ce concept aux travaux menés pour définir la qualité des sols et la surveillance de cette qualité.

In fine, l'intérêt que je porte aux problèmes d'analyse spatiale des sols vise à une meilleure prise en compte du caractère variable des sols, que ce soit au niveau de la connaissance fondamentale de l'entité sol ou de sa place dans une production agricole qui soit durable. Mes travaux de recherche m'ont surtout conduit jusque là à m'intéresser à des méthodes permettant de décrire de façon objective la variabilité spatiale des sols et de tenter de modéliser cette variabilité à partir de facteurs intrinsèques (topographie, substrat). Mes perspectives de recherche intègrent de façon plus explicite le rôle de l'activité humaine sur l'évolution à moyen terme d'indicateurs de qualité des sols, pour intégrer pleinement le sol dans l'évaluation de la durabilité des systèmes de production. Outre le travail à conduire pour définir des indicateurs pertinents, l'accent sera mis sur le couplage des approches spatiales et temporelles des sols afin d'évaluer les effets des pratiques agricoles et des aménagements, non pas uniquement localement, mais à l'échelle d'un paysage. Même si cet objectif présente des difficultés méthodologiques, on dispose à présent d'outils de modélisation, de simulation et de puissance de calcul permettant de concevoir un tel ensemble.

L'application « au terrain » de ce genre d'outils sera également un enjeu crucial. La raréfaction des experts-pédologues capables d'inférer les principales propriétés des sols à partir d'observations simples, une certaine stagnation dans les techniques de terrain mises en œuvre en routine, m'incitent à penser que l'un des défis majeurs de notre discipline sera de former une nouvelle génération de spécialistes des sols conciliant une forte expérience de terrain et une maîtrise suffisante des outils modernes (mesures, bases de données, analyse statistique, modélisation) leur permettant d'appliquer de façon concrète les avancées méthodologiques incontestables de ces dernières décennies.

VI. BIBLIOGRAPHIE²

- ACTON, D.F., GREGORICH, L.J. (Eds) 1995 - La santé de nos sols : vers une agriculture durable au Canada. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques. *Direction générale de la recherche. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, (Ontario), xiv + 138 p.*
- ARROUAYS, D. 1995 - Analyse et modélisation spatiales de l'évolution des stocks de carbone organique des sols à l'échelle d'un paysage pédologique. *Thèse ENSA Montpellier, INRA Orléans, 201 p.*
- ARROUAYS, D., THORETTE, J., DAROUSSIN, J. ET KING, D. 2000 - Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Etude et Gestion des Sols 2000, Volume 8(1)*
- AUROUSSEAU, P., SQUIVIDANT, H. 1996 - Rôle environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds. *Ingénieries EAT -1995, p. 75-85.*
- BAIZE, D. 1986 - Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. *Science du Sol, vol. 24(3), 227-243.*
- BAIZE, D. 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). *INRA Editions, 410 p.*
- BAIZE, D., GIRARD, M.C. (coord.) 1995 - Référentiel Pédologique. *AFES/INRA. INRA Editions, 332 p.*
- BALESDENT, J. 1996 - Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Étude et Gestion des Sols ; 3: 245-60.*
- BANFIELD, C.F., BASCOMB, C.L. 1976 - Variability in three areas of the Denchworth soil map unit. II. Relationships between soil properties and similarities between profiles using laboratory measurements and field observations. *J. of Soil Sci., 27 (3), 438-450.*
- BECKETT, P.H.T, WEBSTER, R. 1971 - Soil variability: A review. *Soils fert., 34, 1-15.*
- BEVEN, K.J. 1996 - The limits of splitting: hydrology. *The Science of the total environment, 183, 80-97.*
- BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J., 1979 - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull., 23, 4, 419-438.*
- BIDOIS, J. 1999 - Aménagement de zones humides ripariennes pour la reconquête de la qualité de l'eau : expérimentation et modélisation - *Doctorat de l'Université de Rennes1 - mention Biologie. 214 p. et annexes.*
- BINET, F., HALLAIRE, V., CURMI, P. 1996 - Agricultural practices and the spatial distribution of earthworms in maize fields. Relationships between earthworms abundance, maize plants and soil compaction. *Soil Biology and Biochemistry, 28(12).*
- BOCQUIER, G. 1973 - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. *Thèse Univ. Strasbourg, 1971, ORSTOM, Paris éditeur, 350 p.*
- BOIFFIN, J., STENGEL, P. 2000 - Réapprendre le sol : nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural. *In Demeter 2000, Economie et Stratégies agricoles, Armand Colin, 152-194*
- BORNAND, M. 1997 - Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux. Enjeux. Besoins en données. Propositions pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. *Rapport d'expertise Ministère de l'Agriculture, Ministère de l'Environnement, INRA, 176 p.*
- BOULAIN, J. 1980 - Pédologie appliquée. *Ed. Masson, 220 p.*
- BOULAIN, J. 1989 - Histoire des pédologues et de la science des sols. *INRA Editions, 289 p.*

² Cf. la liste de publications (§ VII, p. 83) pour les articles référés par leurs numéros.

- BOULET, R., CHAUVEL, A., HUMBEL, F.X., LUCAS, Y. 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. I. Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique. *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M, Pédologie, vol. XIX, 4, 309-321.*
- BOULET, R., CURMI, P., PELLERIN, J., QUEIROZ NETO, J.P. 1989 - Distribution spatiale des horizons dans un versant : apport de l'analyse de leurs relations géométriques. *Science du Sol, 1, 53-56.*
- BOULET, R., CURMI, P., PELLERIN, J., & QUEIROZ-NETO, J.P. 1995 - A contribution to an Understanding of Landscape Development Through Three-Dimensional Morphological Analysis of a Pedological Cover. (Paulinia, State of Sao Paulo, Brazil). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement, 1, 49-59*
- BOUMA, J., STOOORVOGEL, J., VAN ALPHE, B.J., BOOLTINK, H.W.G. 1999 - Pedology, precision agriculture and the changing paradigm of agricultural research. *Soil. Sci. Soc. Am. J. 63: 1763-1768.*
- BOURENNANE, H. 1997 - Etude des lois de distribution spatiale des sols de Petite Beauce. Application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes morphométriques et géostatistiques. *Thèse Université Orléans, 229 p.*
- BOURENNANE, H., KING, D., CHERY, P., BRUAND, A. 1996 - Improving the kriging of a soil variable using slope gradient as external drift. *European Journal of Soil Science 47, 473-483.*
- BRIX, H. 1994 - Use of constructed wetlands in water pollution control - historical developments, present status and future perspectives. *Water Science and Technology 30: 209-223.*
- BRUAND, A. 1990 - Improved prediction of water-retention properties of clayey soils by pedological stratification. *J. of Soil Sci., 41, 491-497.*
- BRUNEAU, P. GASCUEL-ODOUX, C., ROBIN, P., MEROT, P., BEVEN, K. 1995 - Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data. *Hydrol. Proc., 9, 69-81.*
- BRUS, D.J., DE GRUIJTER, J.J. 1997 - Random sampling or geostatistical modelling. Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil. *Geoderma 80, 1-59, with Discussion.*
- BUI, E.N., LOUGHHEAD, A., CORNER, R. 1999 - Extracting soil-landscape maps from previous soil surveys. *Aust. J. Soil. Res., 37, 495-508.*
- BURGESS, T.M. et WEBSTER, R. 1980 - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *J. of Soil Sci., 31: 315-331*
- BURROUGH, P.A., MCDONNELL, R. 1998 - Principles of Geographical Information Systems, *2nd edition, Oxford Univ Press: Oxford, 336 p.*
- BUTLER, B.E. 1980 - Soil Classification for Soil Survey. *Clarendon Press, Oxford.*
- CANNAVACCIUOLO, M. 1998 - Biodiversité et structure spatiale de la faune lombricienne dans une prairie temporaire de l'Ouest de la France. *Université de Rennes I. 150 p*
- CHAPLOT, V. 1998 - Organisation spatiale des sols hydromorphes de fonds de vallée et modélisation prédictive de leur distribution. *Thèse de l'ENSA de Rennes, mention Sciences de l'Environnement, 248 p.*
- CHAUSSOD, R. 1996 - La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Etude et Gestion des Sols, vol. 3(4), 261-278*
- CHAUVET, T. 2000 - Approche par simulation de stratégies de surveillance de la qualité des sols. *Mémoire de DAA ENSAR Traitement de l'Information Spatiale, 51 p. + annexes*
- CHEVERRY, C. 1994 - La dégradation chimique des sols en Bretagne. *Etude et Gestion des Sols. Vol.1 (1), 7-21*
- CHEVERRY, C. 1998 - Agriculture intensive et qualité des eaux. *INRA Editions, Science Update, 297 p.*
- CHIELDS, C. W. 1981 - Field tests for ferrous iron and ferric-organic complexes (on exchange sites or in water-soluble forms) in soils. *Aust. J. Soil Res., 19, 175-180.*

- COCHRAN, W.G. 1977 - Sampling techniques. J. Wiley & Sons, New York.
- COPPENET, M., GOLVEN, J., SIMON, J.C., LE COORE, L., LE ROY, M. 1993 - Evolution chimique des sols en exploitation d'élevage intensif : exemple du Finistère. *Agronomie*, 13, 77-83
- CRAVE, A., GASCUEL, C. 1996 - The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological processes*, 11: 203-210.
- CRESSIE, N. 1991 - Part I. Geostatistical data, In 'Statistics of spatial data.' pp. 29-382 (John Wiley & Sons, New York).
- CURMI, P. 1988 - Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets. *Science du Sol*, 26, 3, 203-214
- CURMI, P. 1993 - Analyse structurale et dynamique actuelle des systèmes pédologiques. Mém. *Habilitation à Diriger des Recherches, Univ. Rennes I*, 83 p. + annexes.
- CURMI, P., WALTER, C., HALLAIRE, V., GASCUEL-ODOUX, C., WIDIATMAKA, TAHA, A., ZIDA, M. 1998 - Les sols du bassin versant du Coët Dan : caractérisation hydrodynamique des volumes pédologiques. In C. Cheverry, (éd.) *Agriculture intensive et qualité des eaux, INRA, Coll Science Update*, 109-127.
- CURMI, P., WIDIATMAKA, PELLERIN, J., RUELLAN, A., 1994 - Saprolite influence on formation of well-drained and hydromorphic horizons in an acid soil system as determined by structural analysis. In A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys (Editors), *Soil Micromorphology : Studies in Management and Genesis, Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. Developments in Soil Science 22, Elsevier, Amsterdam*, 133-140.
- DAGNELIE, P. 1981 - Principes d'expérimentation. *Les presses agronomiques de Gembloux*. 182 p.
- DIGGLE, P.J. 1983 - Statistical analysis of spatial point patterns. *Academic Press, New York*, 148 p.
- DOKOUTCHAEV, V.V. 1893 - Russian Chernozems. *Israel Prog. Sci. Trans., Jerusalem, Israel, 1967, translated by N. Kaner*.
- DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., KAO, C., MEROT, P. 2000 - Une typologie des petites zones humides ripariennes. *Etude et Gestion des Sols*, 7(3), 207-218.
- FORGET, V. 1997 - Cartographie des pédopaysages de l'Ille-et-Vilaine au 1/250 000 sur les zones cartographiées. ENSA Rennes, Ministère de l'Agriculture, 36 p. et annexes.
- GASCUEL-ODOUX, C. 1984 - Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. *Thèse doct. Ing. ENSM Fontainebleau & ENSA-INRA Rennes*, 235 p.
- GASCUEL-ODOUX, C. 1998 - Sols et processus hydrologiques de versant. *Diplôme d'habilitation à diriger des recherches. Université de Rennes 1*, 68 p. + annexes.
- GIRARD, M.C. 1983 - Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. *Thèse Doct. d'Etat. Sols*, 12, 430 p.
- GIRARD, M.C., GIRARD, C.M. 1999 - Traitement des données de télédétection. *Dunod (Technique et ingénierie)*, 527 p.
- GOOVAERTS, P., GERARD, G., FRANKART, R. 1989 - Etude de la variabilité spatiale de quelques propriétés chimiques du sol en Fagnes de Chimay, Belgique. *Pédologie*, 39(1): 191-207.
- GOOVAERTS, P. 1997 - Geostatistics for natural resources evaluation. *Oxford Univ. Press: New York*
- GOOVAERTS, P. 1999 - Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89, 1-46.
- GOOVAERTS, P. 2000 - Estimation or simulation of soil properties ? An optimisation problem with conflicting criteria. *Geoderma* 97, 165-186.
- HAAS, TC 1990 - Kriging and automated variogram modeling within a moving window. *Atmospheric Environment* 24A, 1759-1769
- HAJRASULIHA, S., BANIABBASSI, N., METTHEY, J., NIELSEN, DR. 1980 - Spatial variability of soil sampling for salinity studies in Southwest Iran. *Irrigation Science* 1(4), 197-208.

- HEIMSATH, A.M., DIETRICH, W.E. NISHIIZUMI, K., FINKEL, R.C., 1997. The soil production function and landscape equilibrium. *Nature* 388, 358-388.
- HEIMSATH, A.M., DIETRICH, W.E. NISHIIZUMI, K., FINKEL, R.C., 1999. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth. *Geomorphology* 27, 151-172.
- HENIN, S. 1980 - Du concept de vocation au concept d'aptitude des sols. *Cahiers ORSTOM Pédologie*
- HENIN, S., DUPUIS, M. 1945 - Essai de bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agron.* 1945; 15: 161-72.
- HOOSBEEK, M.R., BOUMA, J. 1998 - Obtaining soil and land quality indicators using research chains and geostatistical methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50 (1998) 35-50.
- IBAÑEZ, J.J., DE ALBA, S., BERMUDEZ, F.F., AND GARCIA ALVAREZ, A. 1995 - Pedodiversity: Concepts and measures, *Catena*, 24: 215-232
- JAMAGNE, M. 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. agron.* 18 (No h.s.), 142
- JAMAGNE, M. 1994 - La cartographie des sols. Analyse spatiale de la couverture pédologique. In *Bonneau M. et Souchier B. (Eds). Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, 2ème édition, 587-618*
- JENNY, H. 1941 - Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. *McGraw Hill Book Company: New York, NY. 281 pp., illus.*
- JENNY, H. 1961 - Derivation of state factor equation of soils and ecosystems. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 25: 385-388.
- JOLIVET, C. 2000 - Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. *Thèse Univ. de Bourgogne, INRA Orléans, 313 p.*
- JOURNEL, A.G., 1983 - Nonparametric estimation of spatial distributions. *Mathematical Geology*, 15, 445-468.
- KIMPE (De), C.R., MOREL, J.L. 2000 - Urban Soil Management : a growing concern. *Soil Science, vol. 165 (1), 31-40.*
- KING, D. 1986 - Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du "Marais de Rochefort". *Thèse de Doct. Ing. INAPG, 159 p.*
- KING, D., DAROUSSIN, J., Tavernier, R. 1994 - Development of a soil geographic database from the Soil Map of the European Communities, *Catena*, 21, 37-56.
- KING, D., BOURENNANE, H., ISAMBERT, M., MACAIRE, J. J., 1999 - Relationship of the presence of a non-calcareous clay-loam horizon to DEM attributes in a gently sloping area. *Geoderma*, 89, 95-111.
- HYRIAKIDIS, P.C., JOURNEL, A.G. 1999 - Geostatistical space-time models : A review. *Mathematical Geology, vol. 31(6), 651-684.*
- LAGACHERIE, P. 1992 - Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Cas de la Petite Région Naturelle de la moyenne vallée de l'Hérault. *Thèse ENSA-INRA Montpellier, 175 p.*
- LAYER, B. 2000 - Rôle du réseau bocager sur la distribution spatiale des sols et le stockage du carbone dans les sols. *Mémoire de DEA national de Science du Sol, 20 p. + annexes.*
- LAVELLE, P. 2000 - Ecological challenges for soil science. *Soil Science, vol. 165 (1), 73-86.*
- LEGROS, J.P. 1978 - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. Précision dans la caractérisation des sols. *Ann. Agron.* 29(6), 583-601.
- LEGROS, J.P. 1996 - Cartographie des sols : de l'analyse spatiale à la gestion des territoires/ - *Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. - (Gérer l'environnement, 10).*
- LELEUX, A., AUROUSSEAU, P., ROUDAUT, A. 1988 - Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. *Science du Sol, vol. 26 (1) - 29-40.*

- LOUGHRAN, R.J., CAMPBELL, B.L. AND WALLING, D.E. 1987 - Soil erosion and sedimentation indicated by caesium 137: Jackmoor Brooke catchment Devon, England. *Catena* 14:201-212.
- MARSMAN, B.A. et GRUIJTER, (De) J.J 1986 - Quality of soil maps. A comparison of soil survey methods in a sandy area. *Soil Survey Papers n° 15, Stiboka, Wageningen*
- M.A.T.E. 1998 - Principes de diffusion des données relatives à l'environnement. *Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. 128 p.*
- MATHERON, G. 1965 - Les variables régionalisées et leur estimation. *Paris. MASSON 305 p.*
- MATHERON, G. 1971 - The theory of regionalized variables and its applications. *Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, N°5.*
- MCBRATNEY, A.B. 1998 - Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50, 51-62.
- MCBRATNEY, A.B., ODEH, I.O.A., BISHOP, T.F.A, DUNBAR, M.S., SHATAR, T.M. 2000 – An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma, vol. 97 (3(4), 293-328.*
- MCBRATNEY, A.B., WHELAN, B.M., WALVOORT, D.J.J., MINASNY, B. 1999 – A purposive sampling scheme for precision agriculture. Pp. 101 – 111 *In J. V. Stafford. (Ed). Precision Agriculture'99. 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense Congress Centre, Denmark*
- MÉROT, P., 1999 - The influence of hedgerow systems on the hydrology of rural catchments in a Temperate Climate. *Agronomie* 19, 655-669
- MEROT, P., GASCUEL-ODOUX, C., CHEVASSU, G. 1986 - Application de la prospection magnéto-tellurique artificielle à l'étude de la profondeur du sol. *Agronomie* 6 (1), 57-66.
- MEROT, P., DURAND, P. 1998 – Le rôle de l'échelle spatiale dans la distribution des sols et la réponse hydrochimique. *In C. Cheverry, (éd.) Agriculture intensive et qualité des eaux, INRA, Coll. Science Update, 267-277.*
- MOL, G., VRIEND, S.P., VAN GAANS, P.F.M. 1998 – Future trends, detectable by soil monitoring networks ? *Journal of Geochemical Exploration, 62, 61-66*
- MOLENAT, J. 1999 - Rôle de la nappe sur les transferts d'eau et de nitrate dans un bassin versant agricole. Etude expérimentale et modélisation. *Thèse de l'Université de Rennes I, mention Sciences de la Terre, Rennes, 269 p*
- MONESTIEZ, P., ALLARD, D., NAVARRO SANCHEZ, I., COURAULT, D. 1999 - Kriging with categorical external drift : use of thematic maps in spatial prediction and application to local climate interpolation for agriculture *in Gomez-Hernandez, J. (ed.); Soares, A. (ed.); Froidevaux, R. (ed.); GeoENV II. Geostatistics for environmental applications 2. European Conference;Valencia (ESP);1998/11/18-20 - 163-174*
- PAPRITZ, A. & WEBSTER, R. 1995 - Estimating temporal change in soil monitoring, *European Journal of Soil Science, 46 : 1-27.*
- RIEU, M. & SPOSITO, G. 1991 - Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties : I Theory. *Soil Science Society of America Journal, 55, 1231-1238.*
- RIPLEY, B.D. 1976 - The second-order analysis of stationary point processes. *J. appl. Prob. 13, 255-266.*
- RIVIERE, J.M., DUPONT, C., TICO, S., ANNEZO, J.F. 1989 - Caractérisation des sols de Bretagne, méthode tarière. *Document mult., Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 26 p*
- ROBERT, M. 1996 - Le sol. Interface dans l'environnement, ressource pour le développement. *Masson, Paris, 245 p.*
- ROBBEZ-MASSON, J.M. 1994 - Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages. *Thèse Sciences Agronomiques, ENSA Montpellier, 173 p.*
- RUELLAN, A., DOSSO, M. 1993 - Regards sur le sol. *Editions Foucher – Aupelf, 192 p.*

- RUELLAN, A., DOSSO, M. FRITSCH, E. 1989 - L'analyse structurale de la couverture pédologique. *Science du Sol, Vol.27, 4, 319-334.*
- SEBILLOTE, M. 1989 - Fertilité et systèmes de production. Essai de problématique générale. *In Fertilité et Systèmes de production, SEBILLOTTE M. (Ed), Editions INRA, 13-57.*
- SMITH, P., ANDREN, O., BRUSSAARD, L., DANGERFIELD, M., EKSCHMITT, K., LAVELLE, P., TATE, K. 1998 - Soil biota and global change at the ecosystem level : describing soil biota in mathematical models. *Global Change Biology, 4, 773-784.*
- SNEDECOR, G.W et COCHRAN, W.G. 1971 - Méthodes statistiques. *Ed. Association de Coordination Technique Agricole. Paris 12 è, 649 p.*
- SOIL SURVEY STAFF. 1951 - Soil Survey Manual. *US Department of Agriculture, Washington, 503 p.*
- SOJKA, R.E., UPCHURCH, D.R. 1999 - Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Sci. Soc. Am. J, 63: 1039-1054*
- STEIN, A., HOOGERWERF, M., BOUMA, J. 1988a - Use of soil map delineations to improve (co-) kriging of point data on moisture deficits. *Geoderma, 43, 163-177.*
- TABBAGH, A., DABAS, M., HESSE, A., PANISSOD, C. 2000 - Soil resistivity : a non-invasive tool to map soil structure horization. *Geoderma, vol. 97, 3-4, 393-404.*
- TESSIER, D., BRUAND, A., LE BISSONNAIS, Y., DAMBRINE, E. 1996 - Qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution. *Etude et Gestion des Sols, vol.3 (4), 229-244.*
- THOM, R. 1993 - Prédire n'est pas expliquer. Entretiens avec Emile Noël. *Collection Champs. Flammarion, 173 p.*
- THOMAS, A.L., DAMBRINE, E., KING, D., PARTY, J.P., PROBST J.P. 1999a - A spatial study of the relationships between streamwater acidity and geology, soils and relief (Vosges, Northeastern France). *Journal of Hydrology, vol. 217,35-45.*
- THOMAS, A. L., KING, D., DAMBRINE, E., COUTURIER, A., ROQUE, J. 1999b - Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma, 90, 291-305.*
- VAUCLIN, M. 1982 - Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol . *Ed. INRA, Publ.: Les colloques de l'INRA n°15, 9-43.*
- VERTES, F. 1995 - Accumulation en phosphore et métaux lourds dans les sols d'exploitations d'élevage intensif en Bretagne occidentale. *Ingénieries, EAT, Spécial Rade Brest, 45-50*
- VISCARRA ROSSEL, R.A., MCBRATNEY, A.B. 1998 - Soil Chemical Analytical Accuracy: Implications from Precision Agriculture. *Aust. J. Exper. Agric 38: 765-775.*
- VOLTZ, M. 1986 - Variabilité spatiale des propriétés physiques en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. *Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSAM, 198 p.*
- VOLTZ, M., WEBSTER, R. 1990 - A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *J. of Soil Science, 41, 473-490.*
- WACKERNAGEL, H. 1998 - Multivariate geostatistics: An introduction with applications. *Springer Verlag : Berlin*
- WEBSTER, R. 2000 - Is soil variation random? *Geoderma (97)3-4, 149-163*
- WEBSTER, R., BECKETT, P.H.T. 1968 - Quality and usefulness of soil maps. *Nature London 219, 680-682*
- WEBSTER, R., OLIVER, M.A. 1990 - Statistical methods in soil and land resource survey. *Spatial Information Systems, Oxford University Press, 316 p.*
- WIDIATMAKA 1994 - Analyse structurale et fonctionnement hydrique d'un système pédologique limoneux acide sur granite et sur schiste du Massif Armoricaïn, France. *Thèse ENSA, Rennes, Sciences de l'Environnement, 260 p. + Annexes*

- WILDING, L.P., DREES, L.R. 1983 - Spatial variability and pedology. in *WILDING L.P., SMECK N.E. et HALL G.F. (Eds), Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and interactions. Chap. IV, 83-116.*
- YAALON, D.H. 1971 - Soil-forming processes in time and space. p. 29-39. In *D.H. Yaalon (ed.) Paleopedology – Origin, nature and dating of paleosols. Int. Soc. Soil. Sci. and Israel Universities Press, Jerusalem, Israel.*
- YATES, S.R. et YATES, M.V. 1988 - Disjunctive kriging as an approach to management decision making. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1554-1558.
- ZINCK, J.A (Ed.) 1992 - Soil survey: perspectives and strategies for the 21 century. *World Soil Resources Report, N° 80, ITC-FAO, 128 p.*
- ZHU, A.X., 2000 – Mapping soil landscape as spatial continua : The neural network approach. *Water Resources Research*, 36 (3), 663-677

VII. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES³

VII.1. Thèse

1. **WALTER, C.** 1990 - Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle: cartographie pédologique et géostatistique sur un secteur du sud de l'Ille-et-Vilaine (France). *Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. ENSA-INRA Rennes, SDS 437, 175 p.*

VII.2. Publications dans des revues à comité de lecture

2. BADEAU, V., DAMBRINE, E., **WALTER, C.** 1999 - Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols, vol. 6(3), 165-180*
3. CHAPLOT, V., BERNOUX, M., **WALTER, C.**, CURMI, P. AND HERPIN, U. 2001 - Soil carbon storage prediction in temperate hydromorphic soils by using morphologic index and Digital Elevation Model. *Soil Science, 166 (1) : 48-60.*
4. CHAPLOT, V., CURMI, P., **WALTER, C.**, BERNOUX, M. 2000 - Analyse de cartes pédologiques pour identifier le rôle du régime tectonique sur la répartition régionale de la perméabilité des altérites. *C.R. Acad. Sci., 330, 479-483*
5. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P. 1999 - Arguments cartographiques en faveur du rôle de la tectonique récente sur la distribution régionale des sols du Massif armoricain. *C.R. Acad. Sci. 329, 487-493*
6. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P. 2000 - Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma, 97, 405-422*
7. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P., GRIMALDI, C. 2000 - Caractères d'hydromorphie et variabilité temporelle de la présence de Fe(II) dans les couvertures pédologiques du Massif armoricain. Exemples de deux toposéquences sur granite et schiste. *C.R. Acad. Sci., 330, 125-132*
8. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P AND HOLLIER-LAROUSSE, A. 2000 – The use of auxiliary geophysical data to improve a soil-landscape model. *Soil Science, 165, 12, 961-970*
9. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P., HOLLIER-LAROUSSE, A. 2001 - Mapping field-scale hydromorphic horizons using Radio-MT electrical resistivity. *Geoderma, 102, 1-2 61-74*
10. COURAULT, D., ALOUI, B., LAGOUARDE, J.P., CLASTRE, P., NICOLAS, H., **WALTER, C.** 1996 - Airborne thermal data for evaluating the spatial distribution of actual evaporation over a watershed in oceanic climatic conditions, application of semi-empirical models. *International Journal of Remote Sensing, vol. 17 no. 12, 2281-2302*
11. CURMI, P., BIDOIS, J., BOURRIE, G., CHEVERRY, C., DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., GERMON, J.C., HALLAIRE, V., HENAULT, C., JAFFREZIC, A., MEROT, P., TROLARD, F., **WALTER, C.** ET ZIDA, M. 1997 - Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. *Etude et Gestion des Sols, vol. 4(2), 95-114*
12. CURMI, P., DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., HALLAIRE, V., MEROT, P., ROBIN, P., TROLARD, F., **WALTER, C.**, BOURRIE, G. 1995 - Le programme CORMORAN-INRA : de l'importance du

³ La numérotation des publications est reprise dans le mémoire scientifique pour appeler les références bibliographiques.

milieu physique dans la régulation biogéochimique de la teneur en nitrate des eau superficielles. *J. Européen d'Hydrologie, tome 26 (1), 37-56.*

13. CURMI, P., DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., MÉROT, P., **WALTER, C.**, TAHA, M. 1998 - Hydromorphic soils hydrology and water quality : spatial distribution and functional modelling at different scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems, 50: 127-142*
14. GASCUEL-ODOUX, C., **WALTER, C.** et VOLTZ, M. 1993 - Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour la prédiction spatiale. *Science du Sol, 31, 4, p. 193-213*
15. MEROT, P., EZZAHAR, B., **WALTER, C.**, AUROUSSEAU, P. 1995 - Mapping soil waterlogging using digital terrain model. *Hydrol. Processes, Vol. 9, 27-34*
16. MEROT, P., GASCUEL-ODOUX, C., **WALTER, C.**, ZHANG, X., MOLENAT, J. 1999 - Bocage landscape and surface water pathways. *Rev. Sci. Eau. 12 (1), 23-44*
17. ROUSSEL, O., BOURMEAU, E., **WALTER, C.** 2001 - Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendement organique. *Etude et Gestion des Sols, vol. 8(1), 67-81.*
18. SAIDI, D., DOUAOUI, A., LE BISSONNAIS, Y., **WALTER, C.** 1998 - Sensibilité de la surface des sols des plaines du Chéiff à la dégradation structurale. *Etude et Gestion des Sols, 6 (1), 15-26*
19. SCHVARTZ, C., **WALTER, C.** 1998 - Constitution d'une Banque de Données Nationale d'Analyses de Terre. *CR Académie d'Agriculture. Vol. 84 (7), 93-102.*
20. SCHVARTZ, C., **WALTER, C.**, CLAUDOT, B., BOUEDO, T., AUROUSSEAU, P. 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. I. Constitution d'une banque de données cantonale. *Etude et Gestion des Sols, vol. 4 (3), 191-204*
21. VISCARRA-ROSSEL, R., PEREZ-HOYOS, A., WALTER, C. 2002 - Accurate predictions of lime requirement for acid soils in the Armorican massif. *Etude et Gestion des Sols, vol. 9,3, 197-212.*
22. **WALTER, C.** 1989 - Analyse de la variabilité spatiale de propriétés du sol au sein de trois unités cartographiques. *Science du Sol, 27(1),73-76*
23. **WALTER, C.** 1993 - L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicatrices confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique. *Science du Sol, 31, 4, p. 215-231*
24. **WALTER, C.**, SCHVARTZ C., CLAUDOT B., BOUEDO T., AUROUSSEAU P. 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Etude et Gestion des Sols, vol. 3 (4), 205-219*
25. **WALTER, C.**, MCBRATNEY, A., DOUAOUI, A., MINASNY, B. 2001 - Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif valley, Algeria, using local kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Australian Journal of Soil Research, 39,1-14*
27. **WALTER, C.**, MEROT, P., LAYER, P. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage on hillslopes. *Soil Use and Management, (accepté).*

VII.3. Ouvrages ou chapitres d'ouvrages - Editions

33. AUROUSSEAU, P., DUPONT, C., JOUBERT, A., **WALTER, C.** 1996 - Les sols d'Ille-et-Vilaine. *Publication du Conseil Général d'Ille-et-Vilaine, LDAA 35, Ch. d'Agriculture 35, ENSA Rennes, 46 p.*
34. CURMI, P., **WALTER, C.**, HALLAIRE, V., GASCUEL-ODOUX, C., WIDIATMAKA, TAHA, A., ZIDA, M. 1998 - Les sols du bassin versant du Coet-Dan : caractéristiques hydrodynamiques des volumes pédologiques. *In : CHEVERRY C. (Editeur). - Agriculture intensive et qualité des eaux. INRA Editions ; collection Science Update, 109-128*

35. CURMI, P., **WALTER, C.**, GASCUEL-ODOUX, C., DURAND, P. 1997 - Interest of class pedotransfer functions and soil distribution models for water quality studies : the case of nitrate in armorican catchments. *in The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe*, Bruand, A., Duval, O., Wösten, J.H.M. & Lilly, A. (Eds), European Commission, DG XII, Brussels, 89-96.
36. GASCUEL, C., BOIVIN, P., **WALTER, C.** 1994 - Eléments de géostatistique. *In "Modélisation mathématique des processus pédologiques"*, Laudelout, Cheverry et Calvet (Eds), Edition Actes, Manuels scientifiques et techniques, 217-262.
37. GASCUEL-ODOUX, C., ROBIN, P., **WALTER, C.**, MOLENAT, J. 1998 - Quelles résolutions spatiales et temporelles sont pertinentes pour la modélisation hydrologique des bassins versants d'ordre 1? *In : CHEVERRY C. (Editeur). - Agriculture intensive et qualité des eaux. INRA Editions ; collection Science Update, 251-266*
38. COLLINS, M., MCBRATNEY, A., VOLTZ, M., **WALTER, C.** (Editors) 2000 – Preface « Developments in quantitative soil resource assessment ». *Geoderma*, vol. 97, 197
39. **WALTER, C.**, CHEVERRY, C. (Eds), 1996 - Sols et transferts de polluants dans les paysages. *Actes des 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols, 22-25/04/96, Rennes (France). Association Française pour l'Etude des Sols, 284 p.*
40. **WALTER, C.**, CURMI, P. 1998 - Les sols du bassin versant du Coetdan : organisation, variabilité spatiale et cartographie. *In : CHEVERRY C. (Editeur). - Agriculture intensive et qualité des eaux. INRA Editions ; collection Science Update, 85-105*
41. **WALTER, C.**, CURMI, P., GASCUEL-ODOUX, C. 1996 - Pertinence du découpage pédologique pour l'estimation spatiale des propriétés physiques du sol. Validation à l'échelle d'un bassin versant. *In Etude des Phénomènes Spatiaux en agriculture, Christophe, Lardon et Monestiez (Eds), La Rochelle, 1995/12/06-08, INRA Editions, Colloques de l'INRA (FRA), n. 78, 97-110*
42. **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M., CHEVERRY, C., QUIDU, O., ANTONI, V., BENARD, Y., DUTIN, G., GARNIER, F. 1997 - Itinéraire pédagogique des sols du nord de l'Ille-et-Vilaine. *Document ENSA-INRA Rennes, Idées Action, DGER, Ministère de l'Agriculture, 67 p.*
43. **WALTER, C.**, SCHVARTZ, C., CLAUDOT, B., AUROUSSEAU, P. ET BOUEDO, T. 1998 - Synthèse nationale des analyses de terre. 2^{ème} édition revue et augmentée, Editée par l'Association Française pour l'Etude des Sols, 69 p+ 25 cartes couleur

VII.4. Publications dans des actes de colloques

(* : avec comité de lecture)

44. CHAPLOT, V., CURMI, P., HOLLIER-LAROUSSE, A., PELLERIN, J., **WALTER, C.** 1997 - The interest of geophysical methods for locating hydromorphic horizons in acid pedological systems. *Proceedings of Sageep 97 : application of geophysics to Engineering and Environmental Problems, Congress, Reno, 23-25 March, 350-360*
45. CHAPLOT, V., **WALTER, C.** ET CURMI, P. 1998 - Modelling the spatial distribution of bottomlands hydric soils using topographical attributes. *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science on CD-ROM ; Montpellier 1998/08/19-25 . Symposium 17 « New tools and methods in soil survey , 7 p.*
46. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P. 1998 - Modelling soil spatial distribution : sensitivity to DEM resolutions and pedological data availability. In Spatial accuracy assessment : land information uncertainty in natural resources. Lowell K. and Annick Jaton (Eds) *Proceedings of 3rd International Symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences. 20-22 may 1998, Ann Arbor Press, Chelsea Michigan, 89-98.**
47. CURMI, P., DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., MÉROT, P., **WALTER, C.**, ZIDA, M. 1997 - Role of water pathways within the landscape on nitrate concentration in surface and subsurface waters : the study case of an armorican catchment. *Proc. III French-Polish Scientific Conference « Agrophysical potential of agricultural ecosystems » on environmental aspects of drainage. Lubostron, 27-28/10/1997, 10 p.*

48. CURMI, P., **WALTER, C.**, GASCUEL-ODOUX, C., DURAND, P. 1996 - Interest of class pedotransfer and soil distribution models for water quality studies : the cas of nitrate in armorican catchments. *Proceedings of the second workshop on 'The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe.'* Orléans, 10-12/10/1996, 89-96.
49. HOLLIER-LAROUSSE, A., CURMI, P., **WALTER, C.**, AUZIZEAU, J., PALMA-LOPES, S., FLEURY, A. 2001 – Variation spatiale et variation temporelle de la résistivité apparente mesurée par la radio magnétotellurique dans des séquences de sols hydromorphes. *in Actes du 3^{ème} Colloque Geofcan Géophysique des Sols et des Formations Superficielles, Orléans, 25-26 /09/2001, 5 p.*
50. SCHVARTZ, C., **WALTER, C.**, DAROUSSIN, J., KING, D. 1998 - Statistical review of soil tests made in France and comparison with the 1 :1,000,000 soil map. *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science on CD-ROM ; Montpellier 1998/08/19-25 . Symposium 17 « New tools and methods in soil survey , 7 p.*
51. **WALTER, C.**, AUROUSSEAU, P. 1992 - Un élément de la précision des cartes pédologiques: la variabilité spatiale des propriétés du sol au sein des unités cartographiques. *in Gestion de l'espace rural et système d'information géographique (Buche, King et Lardon, Eds), INRA Editions, 277-293.**
52. **WALTER, C.**, GASCUEL-ODOUX, C., ROBIN, P. et MEROT, P. 1994 - Is there an optimal spatial scale for hydrological modelling of small agricultural catchments? *EGS (Europeen geophysical society), Grenoble, 25-29 avril 1994. Annales geophysicae, part II sup. II to vol. 12, p. C 438*
53. **WALTER, C.**, VISCARRA ROSSEL, R., McBRATNEY, A.B., 2002 – A spatio-temporal simulation approach of organic carbon at landscape scale. *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science; Bangkok 2002/08/14-21 . Symposium 2 "Landscape scale research: methodology, concepts and consequences for soil and water quality", 13 p.*

VII.5. Communications à des congrès

VII.5.1 Colloques internationaux (* : posters ; ** communications orales)

54. AUROUSSEAU, P., **WALTER, C.** 1991 - Conséquences de l'échelle de variabilité des propriétés du sol sur la stratégie d'échantillonnage et la conception des bases de données de sol. *Workshop on "GIS and Geostatistics" in Soil Science, INRA Montpellier, 29 -30 avril 1991.***
55. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P. 1998 - Modelling the spatial distribution of bottomlands hydric soils using topographical attributes. *16^e Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier 1998/08/19-25 ; Symposium 17 « New tools and methods in soil survey », 6p.**
56. CHAPLOT, V., **WALTER, C.**, CURMI, P. 1998 - Sensitivity of a quantitative soil-landscape model to the precision of the topographical input parameters. *3rd International Symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences. University Laval, Québec : 20-22 mai 1998. ***
57. CHAPLOT, V., BESTAUTTE, E., CURMI, P., HOLLIER-LAROUSSE, A., PELLERIN, J., **WALTER, C.** 1996 - Apport de la géophysique pour l'identification des systèmes pédologiques hydromorphes. *Congrès géophysique de l'ingénieur et de l'environnement, Nantes 1996/11/02-05 ; Environmental and Engineering Geophysical Society, Actes du Congrès, 19-22.***
58. CHAPLOT V.; SANTOS L.J.C.; **WALTER C.**; CURMI P.; CASTRO S.S.; GRIMALDI M. - 1999 Soil cartography using a combination between a soil investigation technique (the structural analysis) and a landscape information (derived from DEM). *IAG regional conference on geomorphology, Rio de Janeiro, Brasil, July 17-22, 1999*
59. COLLINS, M., **WALTER, C.** 1998 - Advances in soil survey using modern tools; methods and results. Introduction to the symposium. *16th World Congress of Soil Science, Montpellier 1998/08/19-25 ; Symposium 17 « New tools and methods in soil survey », 2 p.***

60. COURAULT, D., ALOUI, B., NICOLAS, H., **WALTER, C.**, LAGOUARDE, JP. 1994 - The assessment of actual evaporation over a small catchment using airborne thermal data: Application of semi-empirical relationships in oceanic climatic conditions. *Comm. First Intern. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, 11-15 sept. 1994.* **
61. MCBRATNEY, A., **WALTER, C.** 1999 - Look after the Cents and the Dollars and Euros will look after Themselves : The role of Precision Agriculture in Agro-ecosystem Management. *ASA, CSSA, SSSA Annual Meeting, Salt Lake City, S-01, Oct. 31-Nov 4., Invited oral presentation.* **
62. MEROT, P., CURMI, P., GASCUEL-ODOUX, C., DURAND, P., HALLAIRE, V., ROBIN, P., TROLARD, F., **WALTER, C.** ET BOURRIE, G. 1994 - De l'importance des facteurs du milieu physique et de son aménagement dans le contrôle géochimique de la teneur en nitrate des eaux superficielles : le programme Cormoran-INRA. *Comm. Colloque Association Européenne pour l'Eau et la Santé "La contamination des eaux par les nitrates et les pesticides", 2 et 3 Juin 1994, Rennes***.
63. VERTES F., **WALTER C.**, SIMON J.C., LE ROY M. 2001 - Long term evolution of soil C and N content according to soil type, land use and organic fertilisation practices. *11th International Nitrogen Workshop, Reims, 9-12 September 2001.* *
64. **WALTER, C.** 1993 - A procedure of nested sampling to describe the spatial variability of soil properties within mapping units. *EGS (European Geophysical Society), Wiesbaden, 23-27 mai 1993. Annales geophysicae, sup. II to vol. 11, p. C 299***.
65. **WALTER, C.**, COLLINS, M. 1998 - Advances in soil survey using modern tools; methods and results. Poster synthesis. *16^e Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier 1998/08/19-25 ; Symposium 17 « New tools and methods in soil survey », 7 p.* **
66. **WALTER, C.**, GASCUEL-ODOUX, C., ROBIN, P. et MEROT, P. 1994 - Is there an optimal spatial scale for hydrological modelling of small agricultural catchments? *EGS (European geophysical society), Grenoble, 25-29 avril 1994. Annales geophysicae, part II sup. II to vol. 12, p. C 438***
67. **WALTER, C.**, MCBRATNEY, A. 1999 - Simulation of topsoil organic carbon evolution at the landscape scale. *Pedometrics '99, 3^d Conference of the Working Group on Pedometrics of the International Union of Soil Science, September 27-29, Sydney.* **
68. **WALTER, C.**, MCBRATNEY, A., MARKUS, J. 1999 - Spatial-point-process analysis applied to topsoil lead contamination patterns. *Pedometrics '99, 3^d Conference of the Working Group on Pedometrics of the International Union of Soil Science, September 27-29, Sydney.* **
69. **WALTER C.**, VISCARRA ROSSEL R.A., MCBRATNEY A.B., CHAUVET T. 2001 - Spatio-temporal simulation of soil organic matter at landscape scale. *11th International Nitrogen Workshop, Reims, 9-12 September 2001.* *

VII.5.2 Colloques nationaux

(* : posters ; ** communications orales)

70. BADEAU, V., DAMBRINE, E., **WALTER, C.** 2000 - Effets comparés de l'agriculture et de la forêt sur les propriétés des sols. *In Actes des 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols. Nancy, 25-28 avril 2000.*
71. CURMI, P., BOURRIE, G., CHEVERRY, C., DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., HALLAIRE, V., MEROT, P., PELLERIN, J., ROBIN, P., TROLARD, F., **WALTER, C.** 1996 - Le programme CORMORAN-INRA: rôle du milieu physique sur les chemins de l'eau; incidence sur le contrôle géochimique de la teneur en nitrate des eaux superficielles. *In Actes des 5^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, WALTER, C. et Cheverry C. (Eds), Rennes, 22-25/04/96, 245-246.***
72. GASCUEL, C., **WALTER, C.**, MEROT, P., ZHANG, X. 1997 - Effet d'un réseau de haies sur les écoulements à la surface d'un bassin versant. *Colloque EGPN « L'arbre en réseau », Rennes, 24-25/09/97.***
73. GASCUEL-ODOUX, C., HUBERT-MOY, L., ROBIN, P., **WALTER, C.** 1995 - Quelle échelle est pertinente pour définir les paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu

agricole intensif? *Comm. Colloque final de l'appel d'offres CNRS, 'Modèles, méthodes et théories', Garchy, 6-7 mars 1995.***

74. GASCUEL-ODOUX, C., **WALTER, C.**, ROBIN, P. 1994 - Les échelles pertinentes de la modélisation hydrologique en milieu agricole intensif. *Comm. Séminaire de l'AIP "eau", Thonon, 9-10 février 1994.***
75. HOUBEN, V., AUROUSSEAU, P., **WALTER, C.** 1996 - Incidence des caractéristiques pédologiques et climatiques sur les composantes du rendement du blé. Evaluation du potentiel pédo-climatique du nombre d'épis. *In Actes des 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols, WALTER, C. et CHEVERRY, C. (Eds), Rennes, 22-25/04/96, 33-37.***
76. VOLTZ, M., **WALTER, C.**, GASCUEL, C. 1995 - Estimation spatiale des propriétés des sols : complémentarité des approches par cartographie des sols et géostatistique. *Comm. invitée 'Espace et Sol', AFES, Paris, 7 juin 1995***
77. **WALTER, C.** 1990 - La définition de la variabilité spatiale au sein d'une unité cartographique: l'apport de la géostatistique. *2ièmes Journées Nationales d'Etudes des Sols, Orléans, 19-21 novembre 1990.***
78. **WALTER, C.** 1997 - Géostatistique pour l'analyse spatiale des sols. *Conférence invitée aux Journées Jeunes Chercheurs du département de Science du Sol de l'INRA, Orléans, 29/95/97.***
79. **WALTER, C.**, ANTONI, V., THIERSAULT, N., CHAPLOT V., CURMI P. 1996 - Modélisation prédictive de la distribution spatiale des sols hydromorphes de fonds de vallée à partir de critères topographiques et de substrat. *In Actes des 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols, WALTER, C. et CHEVERRY, C. (Eds), Rennes, 22-25/04/96, 93-94.***
80. **WALTER, C.**, AUROUSSEAU, P. 1991 - Un élément de la précision des cartes pédologiques: la variabilité spatiale des propriétés du sol au sein des unités cartographiques. *Comm. Colloque INRA Gestion de l'espace rural et système d'information géographique, Florac, 22-24 octobre 1991.***
81. **WALTER, C.**, BOUEDO, T. ET AUROUSSEAU, P. 1996 - Approche par enquête de l'évolution en une décennie (1980-84 à 1990-94) de propriétés physico-chimiques des sols de Bretagne. *In Actes des 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols, WALTER, C. et CHEVERRY, C. (Eds), Rennes, 22-25/04/96, 91-92.***
82. **WALTER, C.**, CURMI, P., MEROT, P., THIERSAULT, N., RODRIGUEZ, L. 1995 - Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction des zones hydromorphes en vue de sa généralisation. *Comm. Journée « Transfert d'échelle » du groupe « Etudes des Phénomènes Spatiaux », INRA, Paris 12/12/1995.***
83. **WALTER, C.**, CURMI, P., MEROT, P., THIERSAULT, N., RODRIGUEZ, L. 1994 - Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction des zones hydromorphes en vue de sa généralisation. *Comm. Journée « Transfert d'échelle » du groupe « Etudes des Phénomènes Spatiaux » de l'INRA, Paris, 12 décembre 1995.***
84. **WALTER, C.**, LASSAUSSE, C. 1994 - Recherche d'un niveau de précision optimal dans la définition sémantique des unités cartographiques. *Comm. 4ème Journées de l'Association Française de Science du Sol, Lille, 18-22/04/94.***

VII.6. Rapports d'étude, mémoires scientifiques.

85. CALVET, R., **WALTER, C.** 1993 - Variabilité spatiale des fonctions de transfert du sol et modélisation du devenir des pesticides dans les sols. *Rapport final de contrat DGER, convention 90132, INAPG ENSA-INRA Rennes, 61 p.*
86. CANN, C., VILLEBONNET, C., COMLAN, P., MAITRE, V., NORMAND, M., LOUMAGNE, C., ANSART, P., MEROT, P., CURMI, P., BRUNEAU, P., GASCUEL-ODOUX, C., ROBIN, P., CRAVE, A.,

- DURAND, P., **WALTER, C.**, COURAULT, D., LANGEVIN, C., HRKAL, Z., LEBRET, P., SINAN, M., STEEN HOUDT, M. 1993 - *Rapport final BRETAI, Ministère de la recherche*. 16p.
87. CURMI, P., BOURRIE, G., COURAULT, D., CHEVERRY, C., DURAND, P., GASCUEL-ODOUX, C., HALLAIRE, V., MEROT, P., PELLERIN, J., ROBIN, P., TROLARD, F., **WALTER, C.** 1997 - Caractérisation et modélisation des transferts en milieu agricole intensif. Programme CORMORAN-INRA période 1992-1995. *Rapport de l'AIP " Valorisation et protection des ressources en eau " INRA, programme Valorisation et protection des ressources en eau, 45 p.*
88. CURMI, P., **WALTER, C.**, HOLLIER-LAROUSSE, A., GRIMALDI, C., HALLAIRE, V., GRIMALDI, M., CHAPLOT, V., ZIDA, M., ADAMIADÉ, V., ESNEAULT, S. 2000 – Organisation pédologique et dynamique interne des sols hydromorphes de fonds de vallée ; relations avec la géomorphologie. In P. Mérot (Ed). *Ty-Fon – Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution nitrique. Rapport de synthèse finale. Programme national de Recherche sur les zones humides (PNRSH), 32-42*
89. GASCUEL-ODOUX, C., HUBERT-MOY, L., ROBIN, P., **WALTER, C.** 1994 - Quelle échelle est pertinente pour définir les paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu agricole intensif? *Appel d'offres du programme Environnement CNRS "Méthodes, Modèles et Théories". "Les problèmes de multiplicité d'échelles d'espace et de temps dans les recherches sur l'environnement". Rapport final de contrat 1994, 47 p.*
90. LAYER, B., DUTIN, G., QUIDU, O., **WALTER C.** 2000 – Cartographie des pédopaysages d'Ille-et-Vilaine au 1/250 000 : caractérisation d'unités cartographiques du nord du département. *Programme IGCS Référentiel Pédologique d'Ille-et-Vilaine. ENSA Rennes – Ministère de l'Agriculture, 150 p.*
91. MEROT, P., BIDOIS, J., DURAND, P., **WALTER, C.** 1997 - Quels aménagements dans les zones humides de fonds de vallée? Ingénierie environnementale. *Document INRA Science du Sol Rennes, 34 p.*
92. SABY, N., **WALTER, C.**, COMBO, S., QUIDU, O. 1999 - Constitution et Thématization de la base de données du Référentiel Pédologique du sud de l'Ille-et-Vilaine. *Rapport de fin de Contrat IGCS – Ministère de l'Agriculture, 52 p.*
93. SCHVARTZ, C., **WALTER, C.**, CLAUDOT, B., AUROUSSEAU, P., BOUEDO, T. 1995 - Synthèse nationale des analyses de terre. *Document AFES - DERF, Ministère de l'Agriculture, 49 p, 4 annexes, 21 cartes*
94. THIERRY, J., BLONDEL, M., DUPONT, C., **WALTER, C.**, DERSIGNY, C. 1989 - Le potentiel de production en fonction du milieu pédo-climatique. Premiers résultats sur Maïs en Bretagne. In " *La terre, enjeu d'avenir*", *Chambre Régionale d'Agriculture, 30 novembre 1989, 10 p.*
95. **WALTER, C.** 1992 - Description des fosses pédologiques de Naizin (campagne 1992) – *Programme Cormoran – INRA ENSA Rennes, 23 p.*
96. **WALTER, C.** 1992 - Estimation de la réserve utile à partir des caractéristiques granulométriques d'un échantillon. Note de mise au point. *Note interne, INRA Rennes, 10 p.*
97. **WALTER, C.** 1994 - Evaluation du MNT ISTAR à pas de 20 mètres sur un secteur du sud de l'Ille-et-Vilaine. *Document ENSA-INRA Rennes, 6 p.*
98. **WALTER, C.** 1997 - Référentiel régional pédologique d'Ille-et-Vilaine. Synthèse des travaux dans les zones disposant d'une cartographie préalable. *Rapport de la convention entre la DERF du Ministère de l'Agriculture et l'ENSA de Rennes, 18 p.*
99. **WALTER, C.**, BOUEDO, T., AUROUSSEAU, P. 1995 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. *Rapport final. Conseil Régional de Bretagne - Agence Loire-Bretagne, 31 p.*
100. **WALTER, C.**, CURMI, P., DUPONT, C., RIVIERE, J.M. 1997 - Cahier des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P) pour la réalisation de la cartographie des sols au 1/250 000 de l'Ille-et-Vilaine. *Document approuvé par le Comité Scientifique du programme national IGCS, 6 p.*

101. **WALTER, C.**, DUPONT, C., BLONDEL, R., MATHIEU, J. 1989 - Le potentiel de production en fonction du milieu pédoclimatique. In " *La terre, enjeu d'avenir*", 30 novembre 1989, *Journée Régionale d'Agronomie, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne*, 16 p.
102. **WALTER, C.**, FERRAND, C., QUIDU, O., SQUIVIDANT, H., DUTIN, G. 2001 - Cartographie des pédopaysages de l'Ille-et-Vilaine au 1/250 000 - Programme 2000/2001 : Caractérisation d'unités cartographiques de sols de fonds de vallée en fonction de l'ordre des cours d'eau. *Rapport « Référentiel Pédologique de Bretagne », DERF, Ministère de l'Agriculture*, 70 p.

VII.7. Cartographies pédologiques

103. DUPONT, C., RIVIERE, J.M., **WALTER, C.** 1989 - Carte pédologique de la commune de Breteil (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Carte publiée par l'ENSA-INRA Rennes et la Chambre Départementale d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine.*
104. DUPONT, C., **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M. 1992 - Carte pédologique de la commune de Bédée (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Carte publiée par l'ENSA-INRA Rennes et la Chambre Départementale d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine.*
105. RIVIERE, J.M., **WALTER, C.** 1996 - Carte pédologique d'un secteur d'étude de 700 ha sur les communes de Trans et Pleine-Fougères (Ille-et-Vilaine). *Document ENSA-INRA Rennes.*
106. RIVIERE, J.M., **WALTER, C.**, 1998 - Carte pédologique de la commune de St-Léger des Prés (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Document ENSA-INRA Rennes.*
107. RIVIERE, J.M., **WALTER, C.**, DUPONT, C. 1989 - Carte pédologique de la commune de Chavagne (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Carte publiée par l'ENSA-INRA Rennes et la Chambre Départementale d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine.*
108. **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M., DUPONT, C. 1990 - Carte pédologique de la commune de Saint-Briec des Iffs (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Carte publiée par l'ENSA-INRA Rennes et la Chambre Départementale d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine.*
109. **WALTER, C.**, GOURRU, M. ET NICOLAS, J.M. 1993 - Carte pédologique du bassin-versant de Naizin (Morbihan) à l'échelle du 1/10.000. *Document ENSA-INRA Rennes.*
110. **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M. 1995 - Carte pédologique de la zone avale du bassin-versant du Guyoult et du Marais de Dol (Dol de Bretagne, Mont-Dol) à l'échelle du 1/25.000. *Document ENSA-INRA Rennes*
111. **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M. 1997 - Carte pédologique de la commune de la Chapelle-Thouarault (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Document ENSA-INRA Rennes.*
112. **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M., LASSAUSSE, C. 1994 - Carte pédologique de la commune de Saint-Brice-en-Coglès (Ille-et-Vilaine) à l'échelle du 1/25.000. *Carte publiée par l'ENSA-INRA Rennes et la Chambre Départementale d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine.*

VII.8. Bases de données, articles de vulgarisation ou diffusion sur internet

113. CHEVERRY, C., RIVIERE, J.M., **WALTER, C.** 1997 – Fiches « Dynamique de l'azote dans le sol », « Phosphore dans le sol et dans l'eau », « Variabilité des sols du Massif Armoricaïn », « Lecture d'une analyse de sol », « Lecture d'une étude agro-pédologique », « L'aptitude des sols à l'épandage ». in *Guide Environnement de l'Union des Groupements de Producteurs et des Coopératives.*
114. KING, D., ARROUAYS, D., LAGACHERIE, P., GIRARD, M.C., **WALTER, C.** - Les outils modernes de la cartographie. in *INRA Mensuel, numéro Spécial "Qualité des Sols", à paraître*

115. LEMERCIER B., VERTES, F., WALTER, C. 2002 - Evaluation de la qualité des sols après plusieurs décennies d'épandages intensifs de lisier - Influence du milieu et de la dose de lisier épandu. *Perspectives Agricoles, à paraître.*
116. QUIDU, O., **WALTER, C.** 1998 - Synthèse nationale des analyses de terre. *Serveur Internet, Association Française pour l'Etude des Sols, ENSA-INRA Rennes, ISA Lille, Ministère de l'Agriculture* : <http://viviane.roazhon.inra.fr/snas> (ouverture sur le stand du Ministère de l'Agriculture lors du Congrès Mondial de Science du Sol à Montpellier en août 1998).
117. **WALTER, C.**, CURMI, P., DUPONT, C., FORGET, V., RIVIERE, J.M., SABY, N. 1999 – Référentiel Pédologique d'Ille-et-Vilaine. Système d'information Géographique des sols. *Programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols – Ministère de l'Agriculture.*
118. **WALTER, C.** 1995 - Les zones hydromorphes de fonds de vallée. *In Zones humides Infos, N° 8, 14*
119. **WALTER, C.** 1996 - Les 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols. *Serveur Internet de présentation du Congrès et de diffusion des Actes* : <http://segolene.roazhon.inra.fr/afes> .
120. **WALTER, C.** 1997 - Laboratoire de Science du Sol de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. *Serveur Internet de présentation du laboratoire et listes de liens en matière de Science du Sol* : <http://agro.roazhon.inra.fr/sol>).
121. **WALTER, C.**, AUROUSSEAU, P. - 1999. Fiches matière organique et phosphore dans les sols. *In Atlas de l'Environnement de Bretagne, Conseil régional de Bretagne, 120 p.*
122. **WALTER, C.**, BOUEDO, T., DOSSO, M., EIMBERCK, M., FEDER, F., LATHAM, M. 2000 – Site internet de l'Association Française pour l'Etude des Sols (AFES) : www.inra.fr/afes.

VII.9. Documents d'enseignement

123. AUROUSSEAU, P., **WALTER, C.**, QUIDU, O. 1993 - Notice d'acquisition de base graphique par scanner et de vectorisation - version 2.0 - *Document ENSAR, 7p.*
124. JAFFREZIC, A., RIVIERE, J.M., **WALTER, C.** 2001 – Cours de Science du Sol – Première année, *ENSAR, 100 p.*
125. **WALTER, C.** 1997 - La géographie des sols. *Cours du module CNAM « Sciences du Sol », 10 p.*
126. **WALTER, C.** 1999 - Travail dirigé de géostatistique: guide et 6 exemples. *DAA Génie de l'Environnement, 92 p.*
127. **WALTER, C.** 1998 - L'estimation spatiale de propriétés du milieu physique - Introduction à la géostatistique. *DAA Génie de l'Environnement, ENSA Rennes 19 p.*
128. **WALTER, C.**, AUROUSSEAU, P. 1991 - Notice d'utilisation de Descartes - Représentation assistée par ordinateur de cartes pédologiques et thématiques - version 3.0. *Document ENSAR, 17 p.*
129. **WALTER, C.**, CURMI, P. 1996 - La description de la variabilité des sols du bassin versant du Coet-Dan (Morbihan) - *in Livret Guide de la Tournée de terrain des 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols, 18 p.*
130. **WALTER, C.**, CHEVERRY, C., GASCUEL-ODOUX, C., GILLET, H., LE BAS, J., MEROT, P., RIVIERE, J.M. 1997 - Impact de l'aménagement du territoire sur les ressources en eau et en sol. *Support de cours. Formation continue ENSA Rennes, 19-21 novembre 1997. 110 p.*
131. **WALTER, C.**, CHEVERRY, C., GASCUEL-ODOUX, C., GILLET, H., MEROT, P., RIVIERE, J.M. 1996 - Impact de l'aménagement du territoire sur les ressources en eau et en sol. *Support de cours. Formation continue ENSA Rennes, 13-14 novembre 1996. 90 p.*
132. **WALTER, C.**, RIVIERE, J.M., CHEVERRY, C., QUIDU, O., ANTONI, V., BENARD, Y., DUTIN G., GARNIER G. 1998 - Itinéraire pédagogique des sols du nord de l'Ille-et-Vilaine. *Document ENSA-INRA Rennes, Science du Sol, 67 p.*

