

## **EVALUATION DES CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DE SOLS A DIFFERENTES ECHELLES CAS DES SOLS SULFATES ACIDES SABLEUX DE LA VALLEE DE KATOURE (BASSE CASAMANCE, SENEGAL)**

---

*BOIVIN P., BRAUDEAU E., COLLEUILLE H., EISENLOHR L., MONTOROI J.P.,  
TOUMA J. ET ZANTE P.*

### **RESUME**

Le problème du changement d'échelle est abordé dans le cas d'une étude monodisciplinaire, et discuté en fonction de la variabilité spatiale de résultats expérimentaux. Pour que le changement d'échelle des résultats d'une caractérisation soit possible, il faut au minimum que les conditions d'interpolation soient bonnes, c'est à dire qu'une structure spatiale ait été identifiée. Dans un second temps, l'extrapolabilité de résultats à partir de variables simples est recherchée. Par rapport aux problèmes d'interpolation et d'extrapolation, trois exemples expérimentaux illustrent l'importance de la reconnaissance des structures naturelles, tant au plan des stratégies d'échantillonnage, du choix des protocoles expérimentaux, qu'au niveau du choix du cadre scientifique de l'exploitation des mesures.

### **INTRODUCTION**

Les résultats présentés dans ce texte sont extraits pour l'essentiel de travaux réalisés dans le cadre d'une ATP ORSTOM /CNRS /INRA /CIRAD intitulée «Influence des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols à l'échelle régionale». Ces recherches ont par ailleurs été suscitées par le contexte de catastrophe naturelle que connaît le Sénégal et en particulier la basse Casamance : la sécheresse .

En basse Casamance, la sécheresse a provoqué une modification des régimes hydriques, au niveau des eaux de surface et des nappes superficielles : disparition des écoulements dans le réseau hydrographique, intrusion des eaux salées dans l'estuaire, abaissement et salinisation des nappes superficielles (Boivin et al, 1986). Au niveau des sols des bas fonds, ces phénomènes se

traduisent par une forte dégradation, par salure et acidification, et aboutissent dans la plupart des cas à une désertification.

Les bas fonds de basse Casamance, aménagés en rizières, sont traditionnellement la principale ressource alimentaire de la région. Les pouvoirs public et la population ont donc activement développé une politique d'aménagement en réaction aux dégradations que nous venons de rappeler. Cette politique d'aménagement est basée sur l'édification de petits barrages anti-sel, constitués par des digues de retenue caulinaires équipées d'un ouvrage bétonné sur le lit mineur. Les ouvrages réalisés sont à l'échelle des communautés agricoles villageoises et concernent des surfaces de l'ordre de 100 à 1000 hectares. Les rizières délimitées par des digues ont une superficie de quelques centaines de mètres carrés.

Le développement et l'optimisation des projets d'aménagement font intervenir des calculs de gestion de l'eau au niveau des retenues et du parcellaire, en particulier lorsque les sols sont saturés et que leur dessalement est entrepris par lessivage. Un programme de définition des caractéristiques hydrodynamiques des sols a donc été mis en oeuvre sur un premier site test, les dispositifs expérimentaux envisagés devant permettre une caractérisation des sols depuis l'échelle de la centaine d'hectares jusqu'à celle du profil de sol. Ce travail a permis notamment de mettre en relation les caractéristiques de variabilité et d'organisation du milieu et les problèmes de transfert d'échelle des résultats obtenus. Dans la suite de ce texte, nous illustrerons par quelques exemples précis les principales conclusions qui se sont imposées. Afin de préserver une certaine concision, nos exemples seront extraits de leur contexte global et les aspects «matériel et méthodes» seront très brièvement cités. Les références bibliographiques permettront au lecteur de se reporter aux publications plus détaillées le cas échéant.

## I- MATERIEL ET METHODES : BREF RAPPEL

### I-1 Les sols

On pourra se reporter, pour une étude détaillée, aux descriptions de Boivin (1990) à l'échelle de la parcelle et Colleuille (1989) à l'échelle du profil. Il s'agit d'une façon générale de sols sulfatés acides sableux évolués. La nappe phréatique est peu profonde (1 à 1,5m). Les profils de sol comportent de très nombreuses taches d'oxydo-réduction plus ou moins indurées selon l'importance de l'accumulation d'oxyhydroxydes de fer. La teneur en sable varie de 75 à 90% à 70cm de profondeur, la fraction limoneuse est de l'ordre de 5% et varie peu. La fraction argileuse se déduit donc de la teneur en sables à laquelle elle est très fortement corrélée négativement. En surface on rencontre parfois un horizon superficiel argileux à structure polyédrique. Cet horizon correspond à un dépôt argileux d'environ trente centimètres d'épaisseur, qui occupe d'anciennes dépressions du dépôt sableux. La

répartition spatiale de l'argile correspond donc à des lentilles d'une dimension moyenne d'environ 40 à 50 mètres.

Les facteurs de différenciation des sols sont principalement la mise en place des matériaux (qui détermine la répartition des lentilles d'argile en surface, figure 1) et la pédogenèse. Cette dernière se manifeste sous forme de gradients d'acidité et de salure perpendiculaires au cours d'eau (figure 2). Dans l'espace, tous les paramètres de description morphologique ou analytique des sols présentent donc une organisation, soit sous forme de structures régulières (variables liées à la mise en place des matériaux), soit sous forme de gradients.

A l'échelle du profil de sol et si l'on excepte l'apparition d'une stratification (argile/sable), les variations verticales sont très faibles et permettent de considérer les profils comme homogènes par comparaison aux variations latérales. En particulier dans le cas des profils purement sableux, les profils texturaux et de densité sont presque uniformes (figure 3). Seules les taches d'oxydo-réduction semblent ne pas posséder d'organisation dans leur répartition à l'échelle de la parcelle ou du profil. Elles déterminent une mosaïque complexe à une échelle d'observation plus fine, de l'ordre de la dizaine de centimètres (Colleuille, 1989, et figure 4).

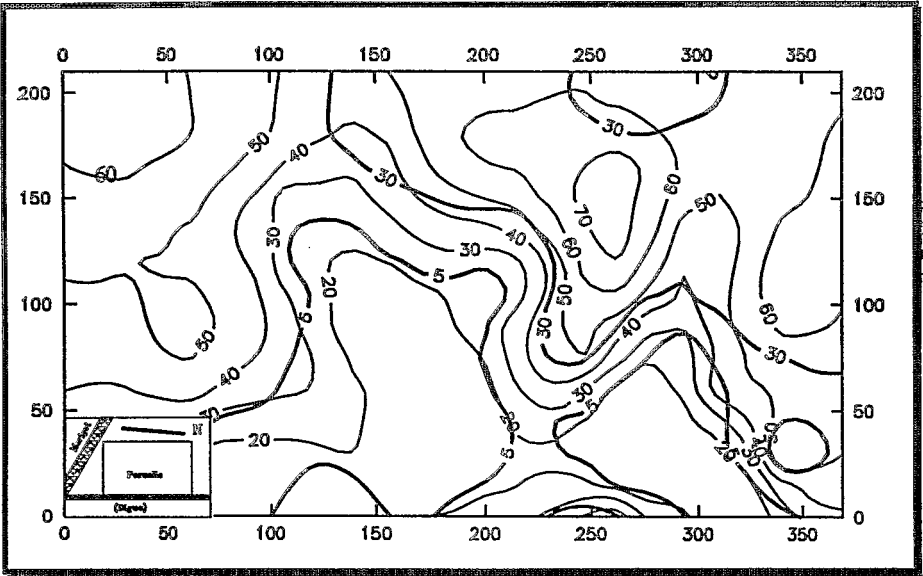


Figure 1. Carte de teneur en argile de la couche 10-30 cm. sur une parcelle de huit hectares. En traits gras figurent les épaisseurs 5 et 30 cm. de l'horizon argileux superficiel

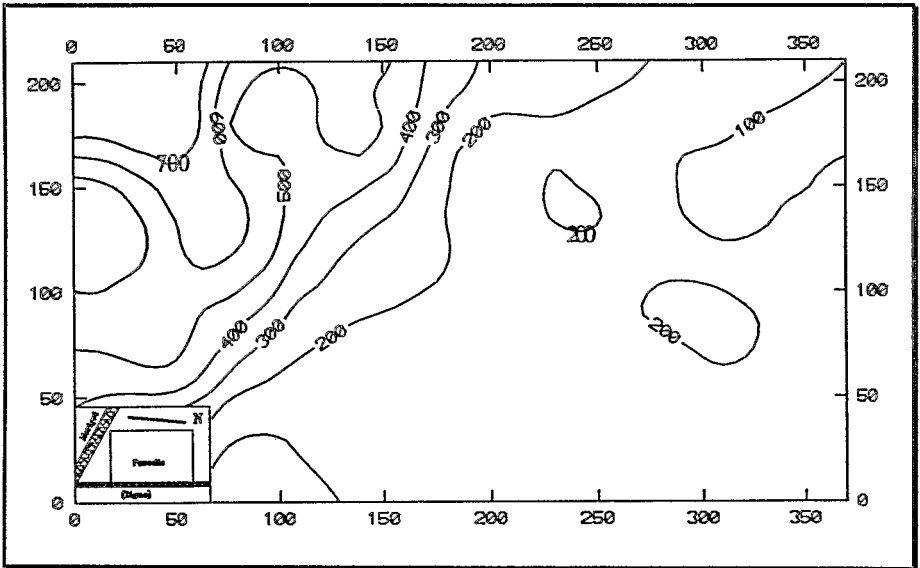
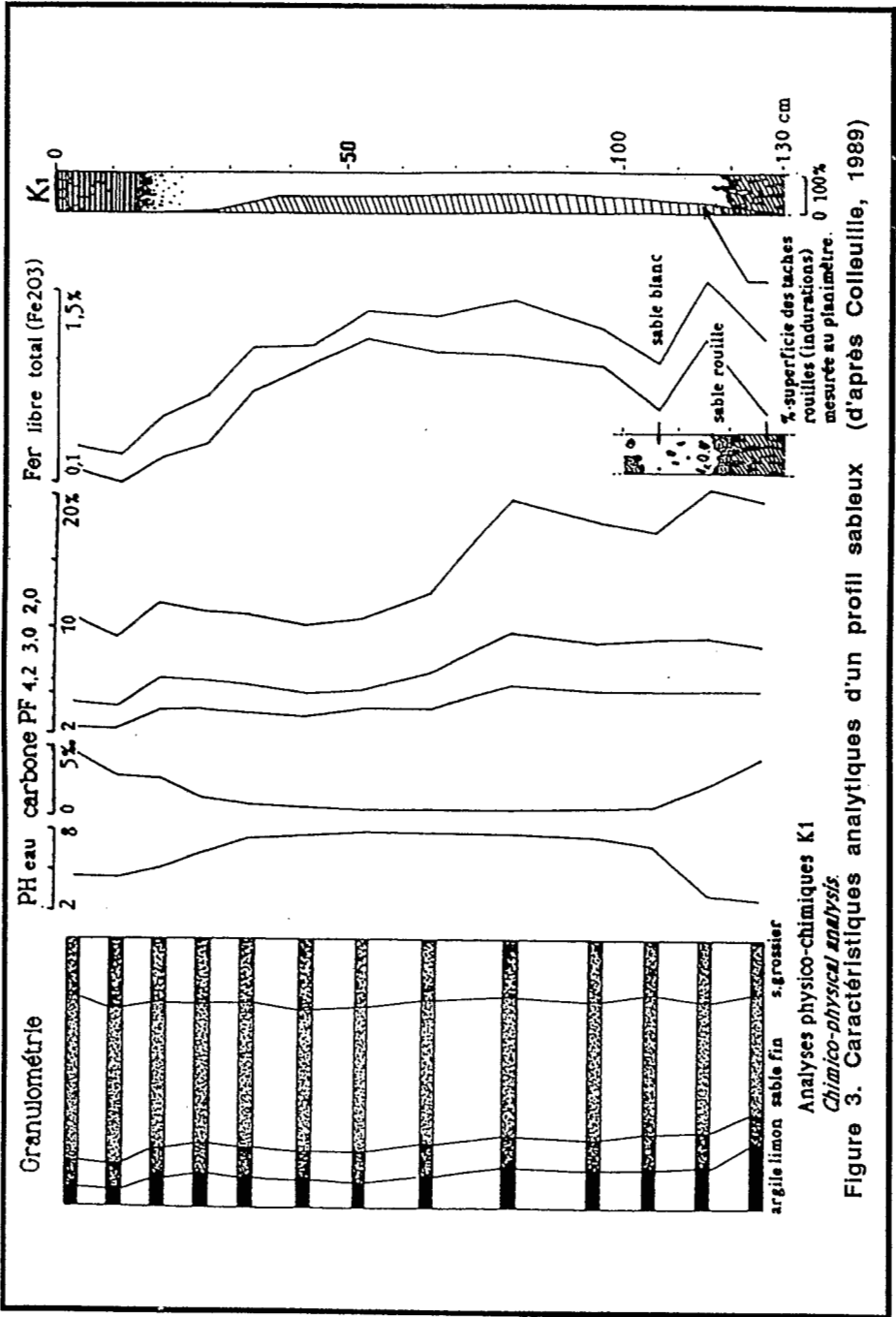


Figure 2. Carte de conductivité électrique de l'extrait 1/5 de sol, valeurs exprimées en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , niveau 10-30 cm, parcelle de huit hectares



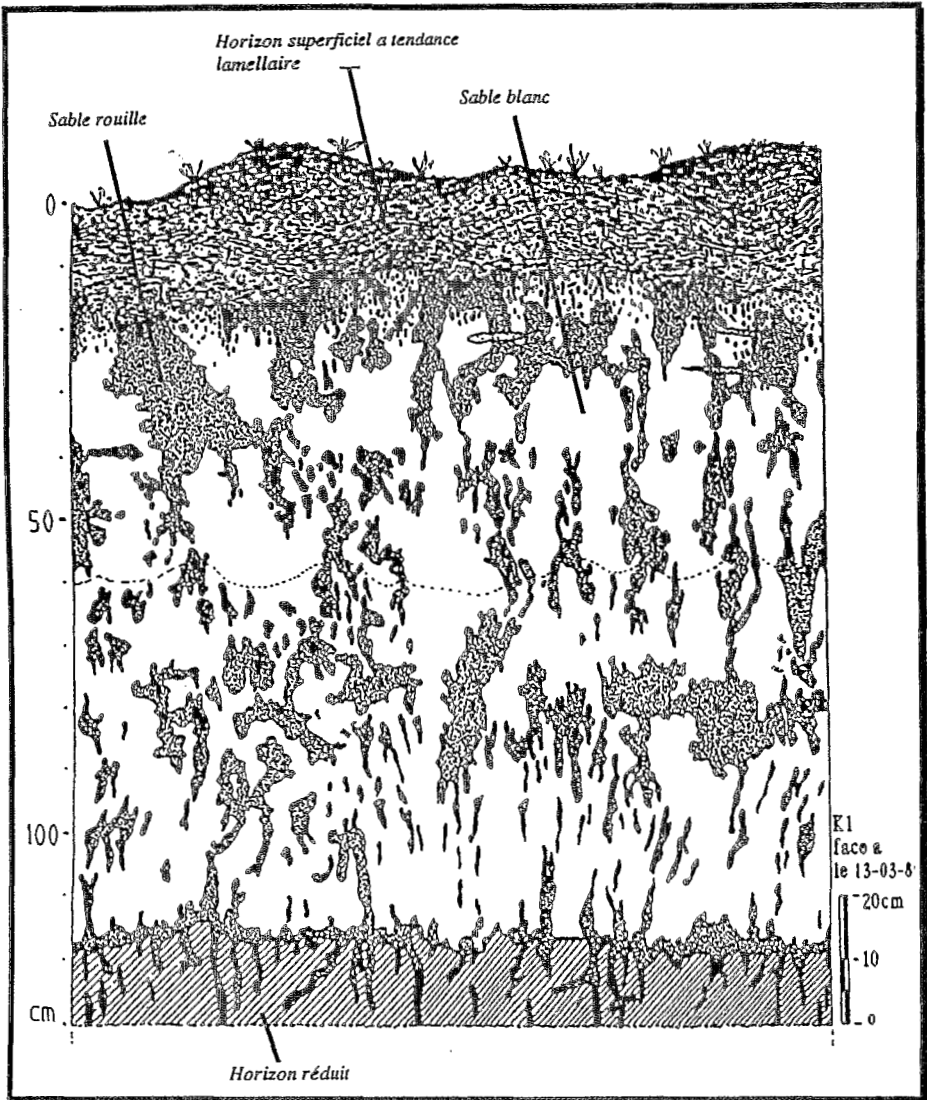


Figure 4. Représentation schématique d'un profil sableux (d'après Colleuille, 1989) montrant la répartition complexe des taches d'oxydo-réduction

## I-2 Grandeurs recherchées et déterminations effectuées

L'effort expérimental a été concentré sur la recherche d'un nombre limité de grandeurs hydrodynamiques, la détermination d'un grand nombre de valeurs étant privilégiée de façon à apprécier de façon précise les caractéristiques de variabilité spatiale. Les deux grandeurs recherchées systématiquement aux différentes échelles ont été la conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ) et la courbe caractéristique de succion  $h(\theta)/\theta$  teneur en eau volumique). Ces deux

grandeurs ont été étudiées au laboratoire et in situ. (Montoroi et al, 1989, Eisenlohr, 1989, Boivin, 1990, Boivin et Touma, 1989, Boivin et al, 1989, Touma et Boivin, 1989).

La détermination de  $K_s$  a été tentée in situ par la méthode de l'infiltromètre double anneau (figure 5) et au laboratoire sur monolithes cylindriques non perturbés. La détermination de la courbe de succion a été effectuée in situ selon le protocole défini par Vachaud et al (1978) et au laboratoire sur monolithes de sol non perturbé à l'aide du rétractomètre (Boivin, 1990). Dans le premier cas, la teneur en eau de l'échantillon est déterminée à l'aide de la sonde à neutrons. Dans le second cas elle est déterminée par pesée. La pression de l'eau est évaluée par une mesure tensiométrique «ponctuelle» dans les deux cas : la céramique qui assure le contact avec le sol mesure 8cm de long dans le cas de la détermination in situ, un centimètre dans le cas de la détermination au laboratoire.

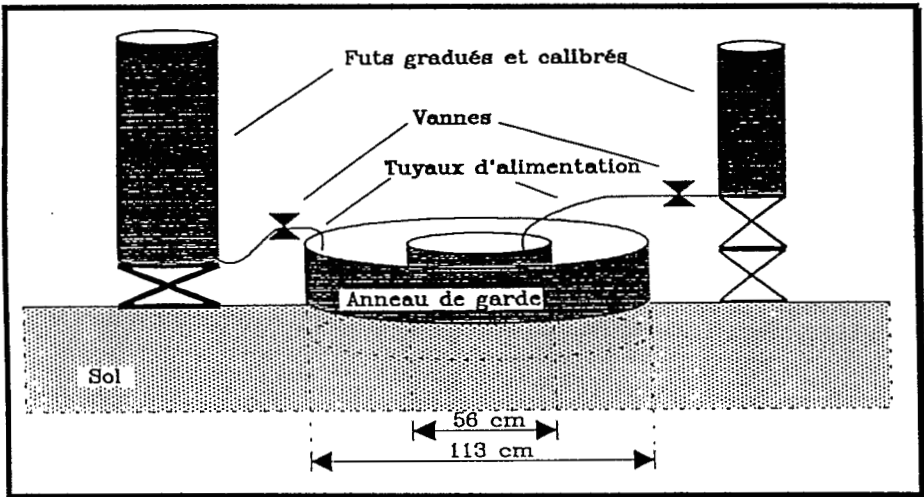


Figure 5. Représentation schématique de l'infiltromètre double-anneau utilisé

## II - RESULTATS EXPERIMENTAUX

### II-1 Evaluation de la courbe de succion in situ à l'échelle d'un horizon

Une caractérisation hydrodynamique «in situ» a été entreprise par Montoroi et al (1989). Il s'agit d'une caractérisation ponctuelle, correspondant à un profil de sol. En pratique, un tube d'accès de sonde à neutrons est installé, de façon à mesurer la teneur en eau du profil de sol à l'aide d'un humidimètre neutronique. De part et d'autre du tube de sonde à neutrons, des tensiomètres sont implantés à différentes profondeurs, afin de déterminer des profils de pression de l'eau. Une fois ce dispositif implanté, le profil de sol est saturé par

une infiltration verticale d'eau sous charge. Puis la redistribution de l'eau dans le sol est étudiée au cours du temps. De cette façon, on dispose par tranche de sol instrumentée d'un ensemble de couples de mesures teneur en eau/ pression de l'eau.

Dans le cas étudié, les profils texturaux et de densité se sont révélés uniformes. Dans ces conditions et s'agissant d'un sol sableux à priori indéformable, on considère généralement que la courbe de succion sera très peu variable. Cependant, Montoroi et al (1989) ont trouvé de fortes variations dans leurs résultats expérimentaux, faisant apparaître autant de comportements différents que de tensiomètres implantés.

Colleuille (1989) a pu expliquer cette hétérogénéité en montrant l'existence d'une relation étroite entre le degré de rigidification du plasma argileux par les oxy-hydroxydes de fer (présents sous forme de taches rouille de coloration plus ou moins intense) et l'aspect de la courbe de succion. Ainsi, deux échantillons correspondant au même type d'accumulation du fer auront le même comportement de gonflement/ retrait et la même courbe de succion. Inversement, si les tensiomètres sont implantés dans des taches rouille d'intensité différente, ils produiront des mesures différentes. Or les taches rouilles correspondent à de petits volumes de forme compliquée et de quelques centimètres de dimension caractéristique. Leur répartition dans le profil de sol est complexe (figure 4). Il devient délicat d'interpréter les résultats de la mesure tensiométrique par tranche de sol (ou horizons), alors que la forte variabilité enregistrée correspond en fait à une organisation se manifestant à une échelle inférieure à celle de l'horizon. Ne pas tenir compte de cette organisation conduirait à définir autant d'horizons fictifs que de tensiomètres implantés ...Ce problème ne se manifeste pas pour les mesures à l'humidimètre neutronique, qui intègrent un volume de sol important.

Ce premier exemple montre qu'au cours d'une seule détermination, un changement d'échelle peut être effectué de façon implicite : l'échelle d'instrumentation correspond à un contact sol / tensiomètre de quelques centimètres carrés, l'interprétation des résultats se fait en supposant l'existence d'horizons homogènes et le tout est destiné à caractériser un profil.

Une structure importante se manifeste à l'échelle de l'instrumentation et n'est pas prise en compte à l'échelle d'interprétation : les résultats deviennent incompréhensibles (ou aléatoirement distribués et fortement variants, ce qui revient au même).



## II-2 Modélisation de la courbe de succion et variabilité à l'échelle de la parcelle

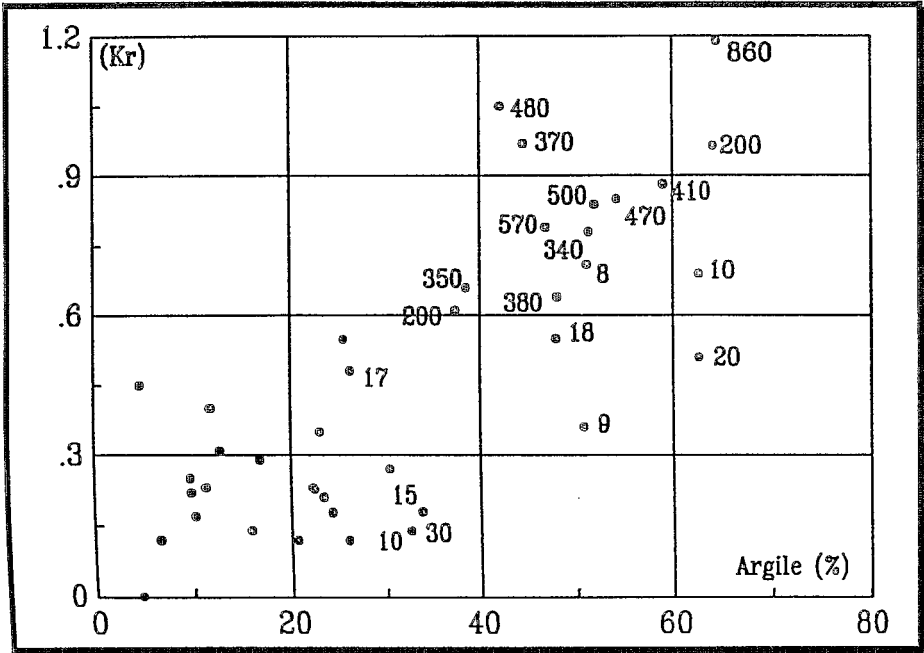
La courbe de succion a été mesurée au laboratoire sur des échantillons provenant de chaque horizon de soixante profils de sols répartis selon un maillage aléatoire sur huit hectares (Boivin, 1990). Les courbes expérimentales ont ensuite été modélisées au moyen d'un modèle classiquement employé par les hydrodynamiciens et représentatif de la plupart des modèles existants (Van Genuchten, 1980).

Ce modèle est défini de façon empirique, de telle sorte que ses paramètres de calage (au nombre de 4) n'ont aucune signification physique. Alors que toutes les variables de description de la couverture pédologique présentent une organisation dans l'espace, les paramètres de calage du modèle de succion sont aléatoirement distribués et ne sont corrélés à aucune autre grandeur. Outre que ce résultat est difficile à admettre, il compromet toute possibilité d'interpolation ou d'extrapolation des courbes caractéristiques de succion : c'est à dire tout changement d'échelle des résultats.

Dans le même temps, les caractéristiques de retrait des échantillons analysés ont été déterminées. Ces caractéristiques sont résumées à partir des paramètres de calage du modèle de la courbe de retrait (Braudeau, 1988 a et b), appelés paramètres pédo-hydriques et dotés d'une signification pédologique et/ou physique. Deux résultats sont à retenir :

1- à l'échelle de la parcelle, la variabilité spatiale des paramètres pédo-hydriques est essentiellement expliquée par la variation de la teneur en argile de l'échantillon de sol, et secondairement par les caractéristiques chimiques de l'échantillon (figure 6). Les valeurs de ces paramètres sont donc nettement organisées dans l'espace. En revanche, Colleuille (1989) a montré qu'à l'échelle du profil de sol, où les caractéristiques chimiques et texturales sont constantes, c'est la teneur en fer total qui explique la variabilité des paramètres pédo-hydriques.

2- Boivin (1990) montre une forte relation entre les points caractéristiques de la courbe de retrait et la forme de la courbe de succion, pour l'ensemble des déterminations effectuées. Dans ces conditions, il est possible de définir des modèles de la courbe de succion faisant intervenir des caractéristiques pédo-hydriques : c'est à dire des paramètres de calage reflétant dans l'espace une organisation liée à la répartition de grandeurs pédologiques simples (texture, pH etc..) (Braudeau et Boivin, en rédaction).



**Figure 6. Exemple de la relation entre teneur en argile (en abscisses ) et Kr (paramètre pédo-hydrrique).**  
**Les valeurs indiquées sur les points sont les conductivités électriques mesurées sur extrait de sol, en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .**  
 (valeurs déterminées sur des échantillons répartis sur des parcelle de huit hectares)

De tels paramètres peuvent être interpolés dans de bonnes conditions (pour le calcul de valeurs ponctuelles ou par blocs, au moyen du krigeage), et probablement extrapolés sur la base de la connaissance des caractéristiques analytiques des sols : un changement d'échelle est envisageable.

Ce deuxième exemple montre que la même détermination analytique peut se prêter ou non au changement d'échelle, selon le cadre scientifique de sa modélisation. Le problème de changement d'échelle n'est plus ici lié aux caractéristiques du milieu lui même, mais dépend de la façon dont les résultats sont synthétisés (choix d'un modèle).

### II-3 Détermination de la conductivité hydraulique à saturation: choix d'une méthode de mesure

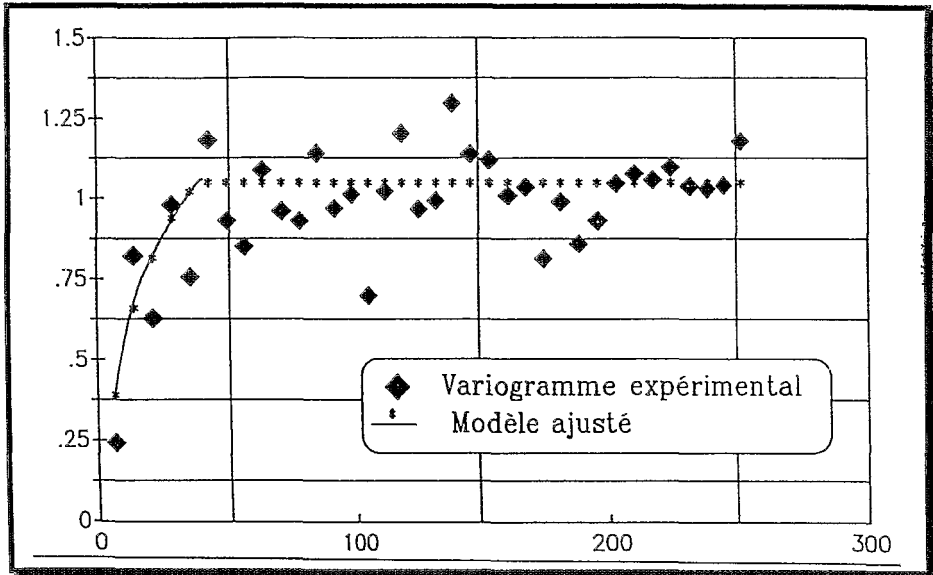
Deux méthodes de détermination de la conductivité hydraulique à saturation ont été testées. La méthode de l'infiltromètre double anneau se fait sur sol non perturbé, au champ, en suivant la cinétique d'infiltration d'une lame d'eau maintenue à une épaisseur constante (Boivin et al, 1988). Pour extraire des courbes expérimentales une estimation de la conductivité hydraulique à saturation, il est nécessaire d'effectuer des hypothèses sur le

déroulement de l'infiltration et l'état initial du sol. Ces hypothèses permettent d'ajuster sur les données expérimentales des lois simplifiées de l'infiltration faisant intervenir la conductivité hydraulique à saturation comme paramètre de calage.

Dans notre cas, les hypothèses préliminaires à l'application des modèles simplifiés d'infiltration ne sont jamais respectées. Touma et Boivin (1988) montrent par simulation numérique que le non respect de ces hypothèses ne modifie pas significativement la cinétique d'infiltration. Dans ces conditions, ils concluent à l'ajustement possible des modèles d'infiltration pour obtenir une estimation de la conductivité hydraulique à saturation. Mais en toute rigueur, la signification physique du paramètre obtenu par ajustement du modèle d'infiltration n'est pas démontrée.

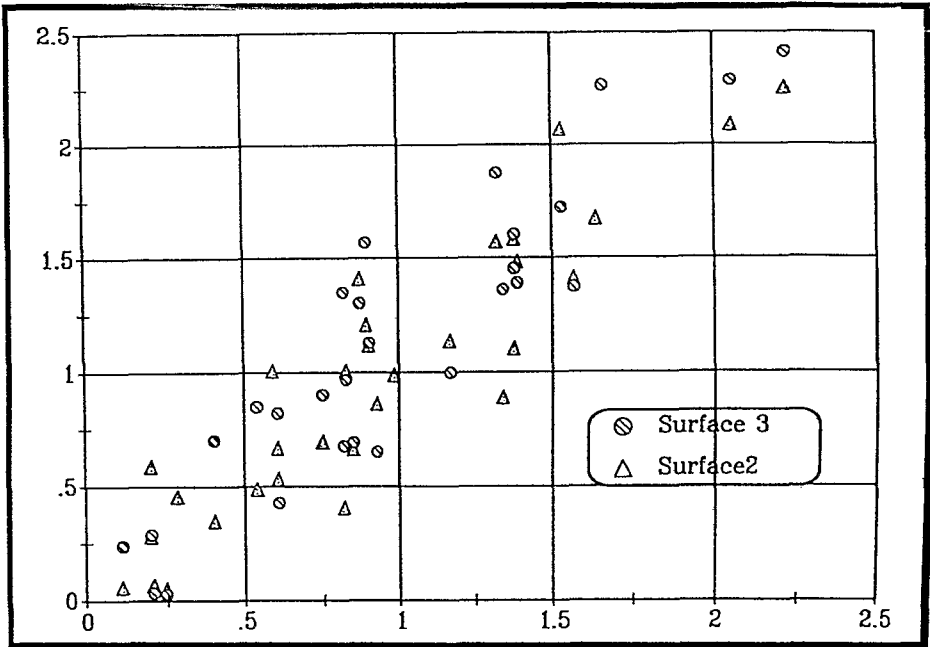
La grandeur ainsi obtenue se révèle peu variante, bien structurée dans l'espace (figure 7). La détermination est reproductible et insensible aux modifications de la dimension du dispositif de mesure (figure 8)(Boivin, 1990, Eisenlohr, 1989). La structure spatiale identifiée est la même que celle des variables pédologiques liées à la mise en place des matériaux. En revanche, la carte interpolée par krigeage des valeurs de conductivité hydraulique à saturation est discordante avec les cartes de ces mêmes paramètres pédologiques.

La seconde méthode employée (Eisenlohr, 1989) est une détermination au laboratoire sur monolithes non perturbés. Dans ces conditions expérimentales, la conductivité hydraulique à saturation peut être déterminée au sens de Darcy sans qu'il y ait de doute sur la signification physique du paramètre obtenu. Mais on montre dans ce cas que les résultats expérimentaux obtenus sont aléatoirement distribués dans l'espace, et présentent sur quelques mètres carrés une variance plus importante que les estimations obtenues par la méthode du double anneau sur huit hectares. La conductivité hydraulique à saturation obtenue au laboratoire est donc une grandeur qui n'est ni interpolable ni extrapolable. Dans ce cas, il semble donc préférable de retenir les estimations effectuées au moyen de l'infiltromètre double anneau, si l'objectif de la détermination est une modélisation à l'échelle de la parcelle ou du profil de sol.



**Figure 7 . Variogramme moyen calculé sur 106 valeurs du logarithme de  $K_s$  obtenu au moyen du dispositif double anneau, et modèle ajusté**

Cette expérimentation montre que la recherche d'une même grandeur peut conduire à des résultats incompatibles d'une méthode à l'autre, si l'on considère la variabilité spatiale des résultats obtenus. Les critères d'organisation dans l'espace peuvent alors permettre de discuter de la validité d'une méthode de détermination. En particulier, le fait qu'un dispositif expérimental permette d'estimer une grandeur physique dans des conditions (physiquement parlant) rigoureuses n'est pas une condition suffisante pour caractériser un milieu naturel dont l'organisation doit pouvoir être reconnue.



**Figure 8 . Relation entre les valeurs de Ks (en cm/heures) déterminées sur les surfaces internes aux différents anneaux (en abscisses : Ks déterminé en surface 1; en ordonnées, Ks déterminé en surface 2 et 3)**

## CONCLUSION

Plusieurs aspects du problème de transfert d'échelle sont illustrés à l'occasion de ce travail.

i) Il existe dans le milieu naturel des structures (et donc des limites structurales) qui se manifestent à certaine échelles. Ces structures doivent être reconnues et prises en compte dans le choix des méthodes d'étude et des stratégies d'échantillonnage. L'économie de ce travail conduira à l'obtention de variables fortement variantes et apparemment désorganisées dans l'espace. Leur interprétation supposera alors la recherche de théories complexes (Burrough, 1983a,b,c; Sisson et Wierenga, 1983, Bresler, 1989). Les problèmes de transfert d'échelle sont alors inabordables.

ii) Le résultat d'une même détermination pourra se révéler indifféremment organisé dans l'espace ou non, selon le choix du modèle d'interprétation. Il s'agit encore d'un problème de reconnaissance des structures naturelles, cette fois-ci au niveau de la conception des modèles qui reproduisent leur fonctionnement.

iii) Une méthode expérimentale doit être discutée en fonction de la rigueur théorique du protocole, mais aussi de son aptitude à identifier les structures naturelles. Une étude de variabilité spatiale permet de mettre en évidence ces propriétés.

Ces trois points conditionnent la possibilité d'effectuer des interpolations ou des extrapolations à partir de l'évaluation ponctuelle d'une grandeur, et sont donc particulièrement importants lorsqu'un transfert d'échelle doit être envisagé.