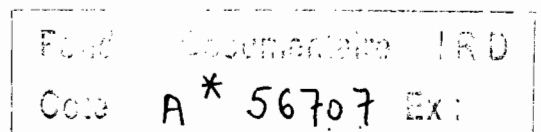


**ETUDE DES TRANSFERTS D'EAU ET DE SOLUTES
DANS LES SOLS DU DOMAINE FLUVIO-MARIN DE BASSE
CASEMANCE EN RELATION AVEC LES PROBLEMES
D'ACIDITE ET DE SALURE**

P. BOIVIN*, B. BARRY**

- * ORSTOM, Laboratoire d'Hydrophysique, 70-74 route d'Aulnay, 93140 BONDY
- ** Institut Sénégalais de Recherches Agricoles ISRA, Centre de Djibelor, ZIGUINCHOR, Sénégal.



1) Rappel des objectifs.

Les sols du domaine fluvio-marin de Basse Casamance regroupent tous les bas-fonds de cette région. Les populations y pratiquent de manière traditionnelle la riziculture inondée ou pluviale, qui représente leur première ressource alimentaire. Le milieu de bas-fonds, lorsqu'il n'est pas mis en culture, est généralement occupé par la mangrove, formation végétale qui abrite une activité biologique intense. Ses ressources naturelles sont également largement exploitées : pêche, pisciculture, récolte de coquillages, de bois et de sel.

Depuis une décennie environ, le déficit pluviométrique et ses effets cumulés ont provoqué une dégradation considérable du milieu naturel ou aménagé. Les facteurs de dégradation sont d'origine chimique : hypersalure et acidification des sols, et sont liés aux transferts d'eau dans le milieu (Boivin et al, 1986; CEE-ORSTOM, 1987).

A terme, cette dégradation aboutit à une disparition de l'écosystème naturel et à une stérilisation chimique des terres, interdisant toute culture.

Face à cette situation, diverses politiques d'aménagement sont engagées, qui font l'objet de polémiques.

L'origine de ce travail est donc la nécessité d'acquérir des connaissances quantitatives sur l'évolution du milieu naturel, particulièrement au niveau des transferts d'eau, de sel et d'acidité, aux différentes échelles intéressant l'aménageur: depuis le profil de sol jusqu'à la petite vallée.

2) Actions de recherche menées

Les actions de recherche ont été concentrées sur un site unique jugé représentatif d'une situation régionale. Il s'agit de la vallée de Katouré, située sur le Kamobeul Bolong, au sud-ouest de Ziguinchor. Une carte de situation est présentée en figure 1. Cette vallée est constituée de sols essentiellement sableux, développés sur des matériaux sableux de plus de six mètres d'épaisseur.

Cette vallée est équipée d'une digue anti-sel munie d'un déversoir à batadeaux depuis 1984. Nous avons retenu pour zone d'étude une parcelle de 100 hectares, dont 18 environ en aval de la digue. L'ensemble du site est présenté en figure 2.

Les interventions ont été ciblées à trois échelles différentes :

- étude des transferts de nappe, sur les 100 hectares;
- étude de l'infiltrabilité des sols, sur une sous-parcelle de 8 hectares;
- étude "in situ" des courbes caractéristiques de quelques profils de sol représentatifs.

3) Etude des transferts de nappe (Responsable : B. Barry)

3.1 Dispositif expérimental et mesures.

Cent piézomètres ont été disposés selon le schéma présenté en figure 2. Les points d'implantation ont été retenus par tirage aléatoire dans un maillage régulier de 50 mètres de côté.

Ces piézomètres ont été reliés à une même cote topographique, le nivellement ayant été bouclé à deux reprises. Une carte topographique du site a été dressée à cette occasion (figure 3).

Le relevé des cotes piézométriques a ensuite été réalisé en saison sèche, avec une fréquence initiale de huit jours les quatre premiers mois, puis de quinze, enfin de trente jours en 1989. Une fois sur deux, les eaux ont été prélevées et analysées : pH, conductivité électrique et aluminium en solution pour les valeurs de pH inférieures à 4.

Enfin la perméabilité de la zone saturée a été estimée pour 74 piézomètres, par essai d'absorption, à l'occasion de l'encadrement d'un mémoire de DEA en collaboration avec la faculté de Dakar (DIAWARA, 1988).

3.2 Résultats

Les cotes de nappe ne semblent pas affectées par la présence de la digue, et leur variation est essentiellement liée à l'évaporation.

Les zones dépressionnaires contiennent des poches de salure résiduelle qui pourront difficilement être évacuées, et favorisent le développement d'une forte acidité. D'autre part, une acidité est également notable à l'emplacement des anciens chenaux de la mangrove.

La digue a un effet protecteur vis à vis de la salure, en bloquant les eaux salées superficielles. En revanche, le transfert de sel par la nappe franchit la digue.

A ce stade, il est clair que l'étude du réseau de piézomètres doit se développer à une échelle plus fine, sur quelques séquences courtes, pour des sites salés ou acides.

Cette conclusion a été dégagée courant 1988, mais les opérations de recherche se sont trouvées bloquées par le départ en formation aux USA de B. Barry (ISRA), responsable de cet aspect. De même de nombreux résultats analytiques sont encore inexploités, notamment concernant les variations granulométriques du matériau.

4. Etude de l'infiltrabilité des sols (Responsable : P. Boivin)

Les objectifs de cette action de recherche sont de déterminer les ordres de grandeur de l'infiltrabilité des sols, sa variabilité spatiale, et de rechercher d'éventuelles relations entre les profils de sols sous-jacents et les variations constatées lors de la détermination de l'infiltrabilité. L'étude de la relation géométrie du dispositif de mesure / variabilité de la mesure s'est avérée nécessaire.

4.1 Matériel et méthodes

Nous avons choisi d'étudier l'infiltrabilité des sols à partir d'un dispositif double-anneau. Ce dernier présente l'intérêt de simuler les conditions d'infiltration obtenues en saison des pluies, l'eau étant retenue par des diguettes sur une mosaïque de petites parcelles. Le dispositif double-anneau présente également l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre dans les conditions de terrain locales.

Les expérimentations menées ont été les suivantes :

-soixante essais répartis sur une parcelle de 8ha. Le plan d'échantillonnage est obtenu par tirage au hasard dans un maillage régulier. La surface de l'anneau interne est de 0.25m², celle de l'anneau externe de 0.75 m²;

-description et analyse physico-chimique des soixante fosses correspondant à ces essais;

-réalisation d'essais d'infiltration répétés sur un même site, avec des temps de repos différents, pour l'étude des caractéristiques initiales de l'infiltration;

-essais d'infiltration avec coloration de l'eau de l'anneau interne, à différentes profondeurs après décapage des couches superficielles : recherche de macropores fonctionnels;

-quinze essais d'infiltration réalisés avec quatre tailles d'anneau interne emboîtées (de 1m² à 0.008m² environ), avec 4m² d'anneau externe;

-trente deux essais avec trois tailles d'anneau interne emboîtées : de 0.008 à 0.25m², avec anneau externe de 1m² (étude de l'influence de la surface de mesure sur la mesure et sa variabilité).

Les deux dernières expérimentations ont été conduites à l'intérieur de la première parcelle de 8ha, représentée en figure 2.

Les essais ont tous été réalisés en aval de la digue anti-sel (site "non-aménagé").

4.2 Résultats et discussion

4.2.1 Dépouillement des courbes d'infiltration

Pratiquement, il s'agit de tester l'ajustement de modèles théoriques par rapport aux données expérimentales. Les modèles testés sont ici ceux de Green et Ampt (1911) et de Philip (1957). L'ajustement et l'interprétation des résultats nous a posé une série de problèmes liés aux conditions expérimentales et aux hypothèses définissant le domaine d'application des modèles précités.

4.2.1.1 Macropores

Le premier problème rencontré est celui de l'existence de macropores.

Ces derniers se manifestent lors de l'infiltration par une première phase d'infiltration très rapide, de courte durée (en moyenne 1.5 mn), correspondant en moyenne à 20mm infiltrés (Boivin et Touma, 1988a).

Ce phénomène apparaît aléatoirement d'un essai à l'autre, ou d'un anneau à l'autre en cas d'essais emboîtés. Toutefois, la fréquence d'apparition est alors plus grande pour les petits anneaux.

Le phénomène a été étudié par répétition d'essais d'infiltration sur un même site, avec des temps d'attente variables entre deux essais (de 2 à 24 heures).

Le volume de "macropores" observé en début d'infiltration n'apparaît pas pour des temps de repos de deux heures, mais réapparaît totalement après 24 heures d'attente.

Les essais de coloration montrent qu'ils s'agit généralement de pores dus aux termites. Ces pores ont été observés dans tous les profils décrits, mais ne sont que très rarement connectés à la surface. Leur présence se matérialise sur les courbes d'infiltration à deux conditions :

- les pores doivent être connectés à la surface;
- ils doivent rencontrer une structure horizontale, en "plaquettes", qui existe par endroit dans les cinq à dix premiers centimètres de sols. Le colorant diffuse alors largement de façon horizontale et cette infiltration préférentielle devient mesurable sur les courbes d'infiltration.

Le fonctionnement de cette macroporosité explique sa distribution aléatoire. Aucun macropore fonctionnel n'a pu être coloré dans le profil de sol, après décapage de la couche superficielle : l'infiltration préférentielle se limite aux premiers centimètres de sol.

La fréquence importante (plus de 50% des essais) de ce phénomène dans les plus petits anneaux pourrait être due à l'éclatement de la couche superficielle à structure horizontale lors de l'enfoncement de ces petits anneaux.

Boivin et Touma (1988a) ont proposé une correction numérique des courbes d'infiltration pour supprimer l'effet des macropores. Cette correction repose sur l'hypothèse vraisemblable que ces macropores n'ont pas d'influence sur l'infiltration une fois qu'ils sont remplis.

4.2.1.2 Profil d'humidité initiale non uniforme

Les profils d'humidité initiale du sol ne sont jamais uniformes dans les conditions expérimentales.

Touma et Boivin (1988b) ont montré, par simulation numérique, que les variations de profil initial rencontrées n'influent pas à plus de 20% sur la détermination du paramètre de Philip ayant l'ordre de grandeur d'une conductivité à saturation (K_s), ou de la conductivité à saturation déterminée par Green et Ampt.

Ce travail autorise donc un élargissement du champ d'application des modèles de Green et Ampt et de Philip pour la détermination des caractéristiques d'une infiltration sous-charge, à des sols au profil d'humidité initiale non uniforme, dans les limites des conditions simulées numériquement.

4.2.1.3 Profils texturaux hétérogènes

La moitié des soixante premiers essais d'infiltration ont été réalisés sur des sols stratifiés : une couche superficielle de 30cm d'argile environ se superposant au substrat sableux. Touma et Boivin (1988b) montrent que dans ces conditions, les paramètres d'infiltration déterminés sont ceux de la couche argileuse superficielle.

Toutefois, dans un souci de simplification, les essais ultérieurs (emboîtés) ont été réalisés sur les sites purement sableux.

4.2.2 Résultats

Le dépouillement des courbes d'infiltration aboutit principalement à la détermination d'une grandeur ayant les dimensions et l'ordre de grandeur d'une conductivité à saturation (Philip), ou étant proposée en estimation de K_s (Green et Ampt). Bien que nos conditions expérimentales ne nous permettent pas, en toute rigueur, d'affirmer que nous avons déterminé un K_s , nous proposons d'adopter les valeurs que nous avons identifiées comme estimation de K_s , dont la détermination réelle reste quoiqu'il en soit un problème expérimental, dans les conditions de nos essais.

a) Variabilité spatiale

K_s possède une loi de distribution lognormale, si l'on retient pour l'évaluer des valeurs non autocorrélées. Toutefois le coefficient de variation est faible (environ 30%). Les essais emboîtés ont été réalisés sur deux hectares, correspondant à une zone sableuse à forte perméabilité. Cette zone est donc largement sur-échantillonnée par des valeurs fortement autocorrélées (ci-après). Dans ces conditions, la loi de répartition de l'ensemble des valeurs se rapproche d'une loi normale.

Les valeurs de K_s sont fortement autocorrélées, le variogramme moyen calculé sur le logarithme de cette grandeur correspond à la somme de deux schémas sphériques : de portées respectives 14 et 40 mètres, d'effet de pépite nul et de paliers (normés par la variance) 0.28 et 0.77.

Le sur-échantillonnage mentionné ci-avant ne modifie pas l'estimation de la structure spatiale de K_s . De même, une carte de $\log(K_s)$ calculée à partir du premier schéma d'échantillonnage

(60 points) estime correctement les 46 valeurs mesurées ultérieurement : les cartes calculées sur 60 ou 107 points sont équivalentes. Ks semble donc satisfaire aux hypothèses de stationnarité et d'ergodicité.

b) Influence de la dimension du dispositif

La comparaison des valeurs obtenues pour différentes surfaces de mesure en un même point montre que la mesure est totalement indépendante de la dimension de l'anneau interne du dispositif double-anneau, pour des diamètres variant de 10 à 50cm. Les valeurs obtenues sont corrélées (coefficient de corrélation de l'ordre de 0.92 pour trente neuf mesures), pour une relation linéaire de pente 1 et de cote 0 (fig 4) (Eisenlohr, L., 1989). Ce résultat confirme la présence d'un effet de pépite nul dans notre cas. Une telle stabilité de la mesure est à notre connaissance un fait exceptionnel (Sisson et Wierenga, 1981).

4.2.3 Caractéristiques des sols

Aucune relation simple n'a pu être établie entre les paramètres de la loi d'infiltration et les caractéristiques morphologiques ou analytiques des profils sous-jacents.

La répartition spatiale des ions Na et Al échangeables, et du pH, confirme les hypothèses géochimiques de J.Y. Lebrun et al (1987) concernant la genèse actuelle d'une forte acidité à sulfates d'aluminium, de magnésium et de fer dans ce milieu. Les sols acides apparaissent dans l'espace dès qu'il y a dessalement.

Les variables présentent pour la plupart une structure spatiale de schéma sphérique, de portée supérieure ou égale à celle de (A) : de 40 à 70 mètres.

4.3 Conclusion

Nous disposons d'une méthode expérimentale permettant d'estimer une grandeur que nous proposons pour estimateur de Ks. Elle nous permet de définir un échantillonnage optimal en vue d'une cartographie (Boivin et Touma, 1988c), et nous procure un estimateur non biaisé pour l'interpolation entre deux points de mesure. Un débat de fond persiste quand à la signification physique de la mesure, mais la méthode possède ici l'avantage d'être fiable, robuste et globale.

5. Caractérisation hydrodynamique "in situ" (responsable : J.P. Montoroi)

5.1 Essais de caractérisation hydrodynamique "in situ"

Des essais de caractérisation hydrodynamique "in situ" ont été conduits, à l'intérieur de la parcelle étudiée ci-dessus, pour deux sites jugés représentatifs de deux situations moyennes :

- sol sableux : deux caractérisations;
- sol stratifié (80cm d'argile) : une caractérisation.

Le résultat de ce travail est consigné, dans le cas du sol sableux, dans le rapport de J.P. Montoroi et al (1989).

Le principal problème posé par le dépouillement est l'apparition de cinq couches hydrodynamiques distinctes au niveau des courbes $H(\varnothing)$ et $K(\varnothing)$: autant que d'horizons étudiés à partir du dispositif. Tandis que les caractéristiques texturales et de densité du profil indiquent une faible variabilité verticale.

Les traitements de données ont été réalisés, pour ce travail, à l'aide des logiciels AIDHYS, CARHYD et ETHUNE (IMG).

5.2 Etude critique du dispositif : variabilité morphologique et analytique du profil de sol

A la suite de ces résultats, l'homogénéité du profil a fait l'objet d'une étude critique (Coleuille, H., 1989) par différentes méthodes.

- l'homogénéité texturale est confirmée;
- l'inexistence de macropores fonctionnels est démontrée (coloration);
- les études macro et micromorphologiques mettent en évidence l'existence d'organisations pédologiques (indurations, cimentation des plasmas par des oxy-hydroxydes de Fer) à l'échelle décimétrique;
- la rétractométrie permet de quantifier les différences structurales existant entre ces organisations dans un même horizon : rigidification du plasma, variations importantes des macro et micro porosités;
- la position des différents tensiomètres au sein des organisations ainsi reconnues permet d'expliquer de façon cohérente leurs écarts de comportement.

En conclusion, ce travail montre :

- que l'homogénéité texturale n'est pas un critère suffisant pour la réalisation d'essais de caractérisation hydrodynamique destinés à définir globalement un profil ou un horizon;
- qu'une caractérisation du sol par rétractométrie (Braudeau, E., 1988) a le même pouvoir de discrimination que des observations micro et macro morphologiques;
- que les hétérogénéités mises en évidence ont une incidence sur le comportement hydrodynamique du sol.

Nous préconisons donc une caractérisation du sol par rétractométrie comme préalable à la réalisation d'essais de caractérisation hydrodynamique "in situ".

Enfin, il apparaît clairement que cette dernière méthode est inadaptée dans notre cas. Elle vise à caractériser un sol à l'échelle de l'horizon, mais l'échelle de l'instrumentation (tensiomètres) est plus détaillée et correspond à une forte hétérogénéité. Les résultats deviennent ininterprétables.

6. Etalonnage d'une sonde à neutrons en milieu chloruré (responsable : P.Zante)

En marge des expérimentations précitées, il a été nécessaire d'éclaircir les conditions d'emploi d'une sonde à neutrons en milieu chloruré : le chlore figure parmi les atomes susceptibles de minorer fortement le résultat d'une mesure neutronique, sans qu'aucune abaque d'étalonnage ne soit publiée à ce jour. Montroi et Zante (1989) ont consigné dans un rapport, joint en annexe, un premier travail original. Les résultats indiquent une bonne droite d'étalonnage entre comptage neutronique et teneur en eau pour une séquence de sols où la conductivité électrique de l'extrait de sol varie de 0 à 1.5 mS/cm sur extrait 1/5 de sol. Cette dernière valeur correspond, sur sol sableux, au maximum de salure pour lequel une culture traditionnelle peut être envisagée dans la région.

L'utilisation de l'humidimètre neutronique ne poserait donc pas de problème particulier dans la limite de cette gamme de salure.

7. Conclusion

7.1 Principaux résultats acquis.

Les principaux résultats acquis se situent à l'échelle de la parcelle et du profil de sol et concernent la méthodologie de travail.

a) La mesure de l'infiltrabilité des sols par la méthode du double anneau et l'ajustement des modèles de Philip (1957) ou Green Ampt (1911) est étendue aux cas de sols dont le profil d'humidité initiale n'est pas uniforme.

b) Pour le site d'étude, le dispositif double anneau procure une mesure robuste et fiable, permettant une évaluation simple de la grandeur K_s pour un profil de sol. Les contraintes d'échantillonnage pour une estimation spatiale sont définies avec précision.

c) L'étude des caractéristiques hydrodynamiques "in situ" ne peut pas se faire de façon classique. Des différenciations pédologiques du matériau à l'échelle décimétrique invalident l'interprétation des mesures tensiométriques à l'échelle du profil.

d) La rétractométrie permet de quantifier de façon fiable les hétérogénéités internes du profil et de les mettre en relation avec les variations des mesures tensiométriques. Cette méthode est donc envisageable en étude préalable à un essai de caractérisation hydrodynamique "in situ".

e) Le milieu sol présente des structures et donc des discontinuités à deux échelles : l'échelle décimétrique d'une part, puis l'échelle de la cinquantaine de mètres. Une instrumentation réalisée à l'une de ces échelles ne permet pas de caractériser le milieu à une autre échelle. En revanche, les mesures globales sur profil de sol permettent de caractériser de façon précise la parcelle.

7.2 Apports de l'ATP

La participation à l'ATP a permis d'instituer des collaborations destinées à se développer :

- entre l'ORSTOM et l'ISRA;
- entre ces deux instituts et l'IMG.

Ces collaborations se sont particulièrement bien déroulées. La collaboration ORSTOM-ISRA a notamment permis une parfaite mise en commun des moyens de travail et des effectifs au bénéfice de tous.

La collaboration avec l'IMG a permis la formation des chercheurs de l'ORSTOM et de l'ISRA à un ensemble de méthodologies de caractérisation.

Les contacts créés à l'occasion des journées ATP revêtent également une grande importance, dans le contexte d'isolement et de précarité que connaissent les équipes outre-mer. La participation à l'ATP a donc été pour chacun une opportunité de progression et de dynamisation dans tous les secteurs de notre activité.

Références bibliographiques

a) Issues de l'ATP

BOIVIN, P., TOUMA, J. et ZANTE, P., 1988a, Mesure de l'infiltrabilité des sols par la méthode du double anneau. I Résultats expérimentaux, Cahiers de Pédologie Orstom, 88-I.

BOIVIN, P., et TOUMA, J., 1988c, Mesure de l'infiltrabilité des sols par la méthode du double anneau. III Variabilité spatiale, Cahiers de Pédologie Orstom, 88-III.

COLLEUILLE, H., 1989, Relations entre le comportement hydrodynamique d'un sol et sa morphologie. Mémoire de DEA, Université Paris VI.

DIAWARA, B., 1988, Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe des formations fluvio-marines du bolong de Katoure. DEA de Géologie appliquée, Université Cheikh Anta Diop, Dakar.

EISENLOHR, L., 1989, Influence de la géométrie d'un dispositif Muntz sur la mesure d'infiltrabilité et sa variabilité, Mémoire de DEA, Université Paris VI.

MONTOROI, J.P., TOUMA, J. et ZANTE, P., 1989, Caractérisation hydrodynamique "in situ" d'un sol sableux de la vallée de Katoure, multig. ORSTOM Dakar, 19 pages + figures.

MONTOROI, J.P., et ZANTE, P., 1989, Etalonnage d'une sonde neutronique en milieu chloruré, Multig. Orstom Dakar, 25 pages.

TOUMA, J. et BOIVIN, P., 1988b, Mesure de l'infiltrabilité des sols par la méthode du double anneau. II Simulation numérique, Cahiers de Pédologie Orstom, 88-I.

b) Autres

BOIVIN, P., LOYER, J.Y., MOUGENOT, B. et ZANTE, P., 1986, Sécheresse et évolution des sédiments fluvio-marins au Sénégal, INQUA, Symposium Dakar 1986, pp 49-53.

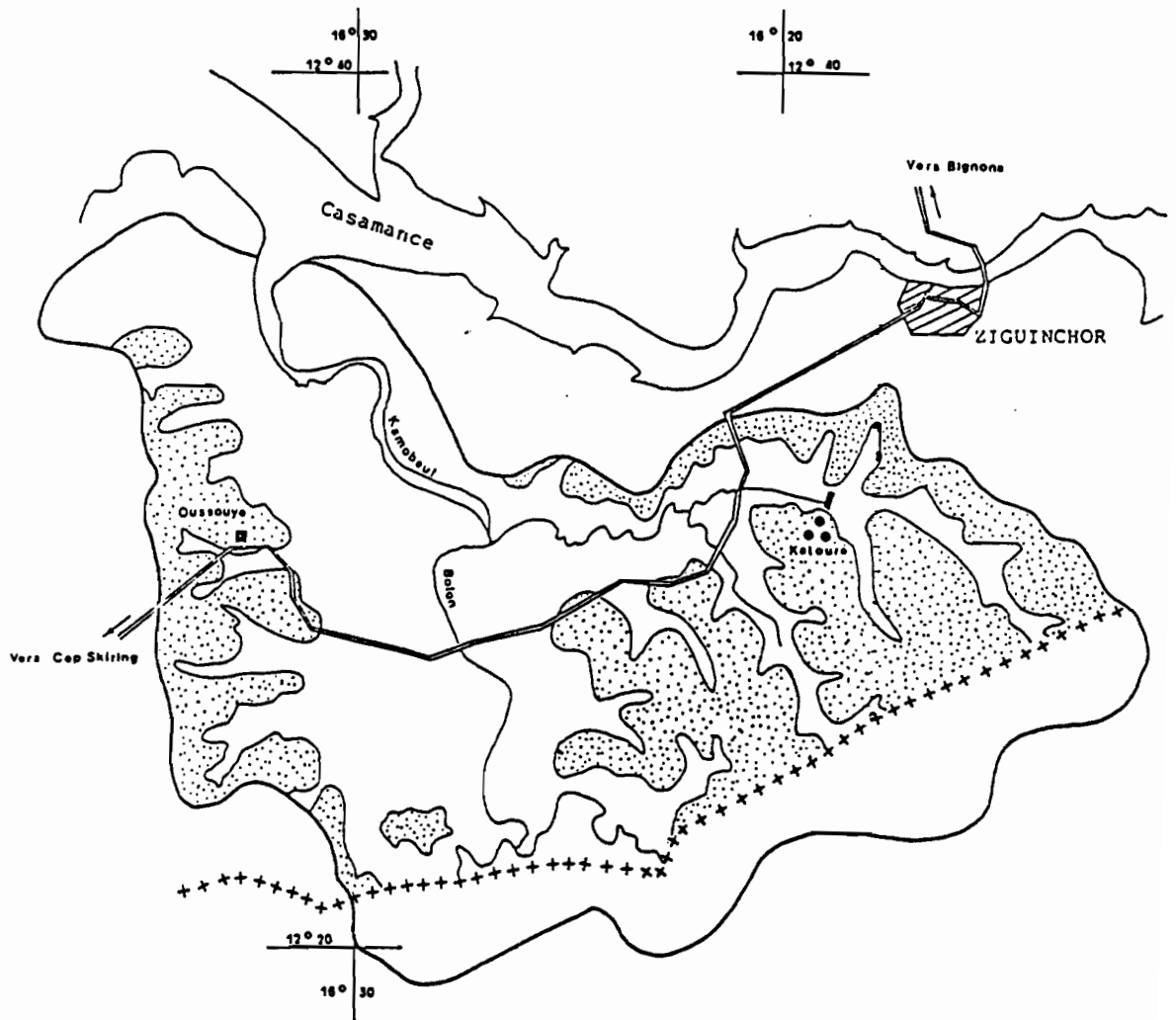
CEE-ORSTOM, 1988, Mise en valeur des mangroves au Sénégal, Commission des Communautés Européennes, contrat TSD-A-104 MR, rapport final, Multig. Orstom Montpellier, 64 pp.

GREEN, W.H., AMPT, G.A., 1911, Studies on soil physics. 1 : The flow of air and water through soils. J. Agric. Sci., 4, 1-24

LE BRUSQ, J.Y., LOYER, J.Y., MOUGENOT, B., CARN, M., 1987, Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de magnésium et de fer, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal, Science du sol, 1987, 3, Vol. 5, pp 173-184.

PHILIP, J.R., 1957, The theory of infiltration : 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci., 84, (257-264)

SISSON, J.B. & WIERENGA, P.J., 1981, Spatial Variability of Steady-State Infiltration Rates as a Stochastic Process, Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 699-704.



- ~ Limite du bassin versant
 - == Route bitumée
 - +++ Frontière avec la Guinée-Bissau
 - / Barrage anti-sel
 - ▨ Plateaux sur continental terminal
- Echelle: 0 5 10 km

CARTE DE SITUATION: BASSIN VERSANT DU KAMOBÉUL BOLON

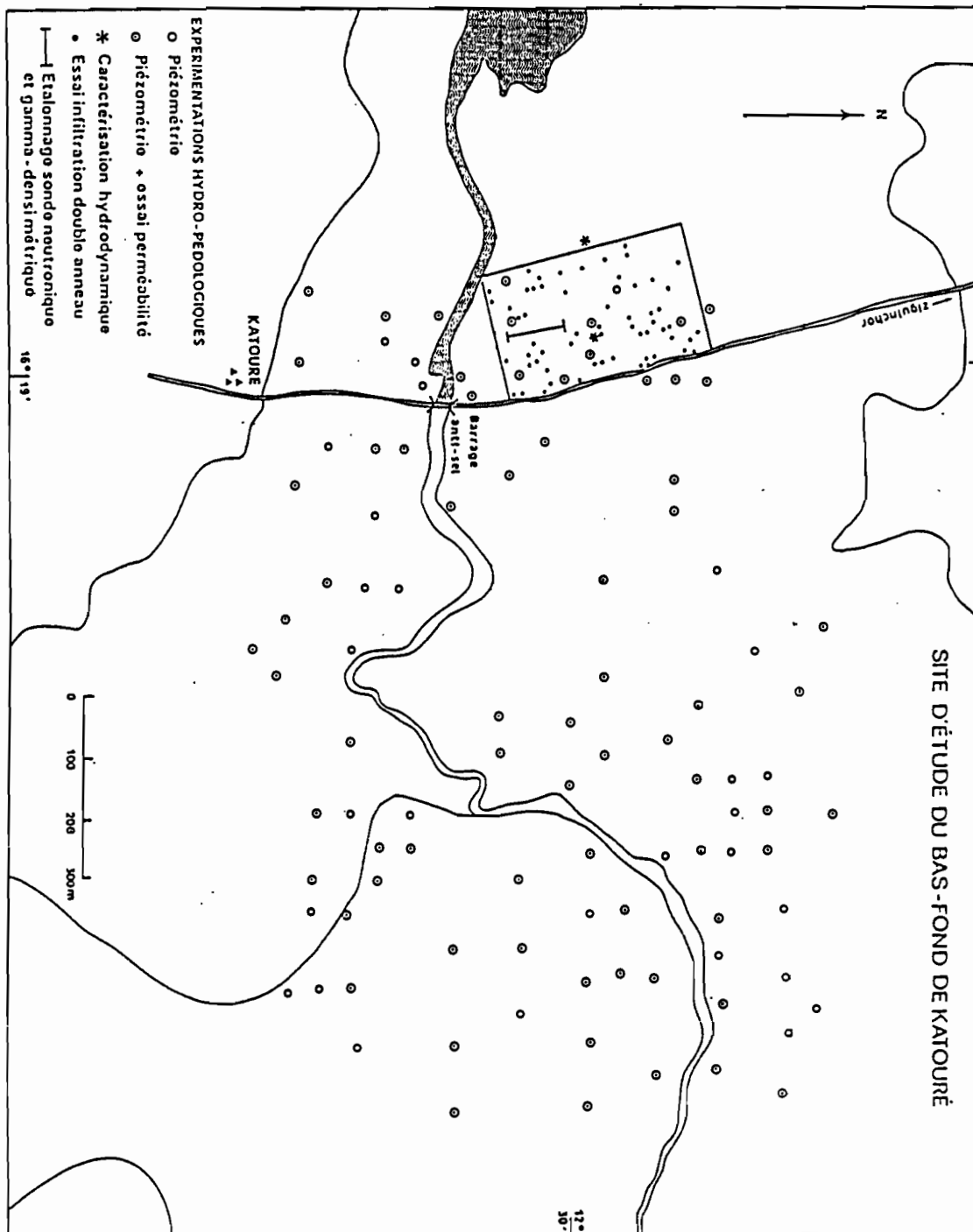
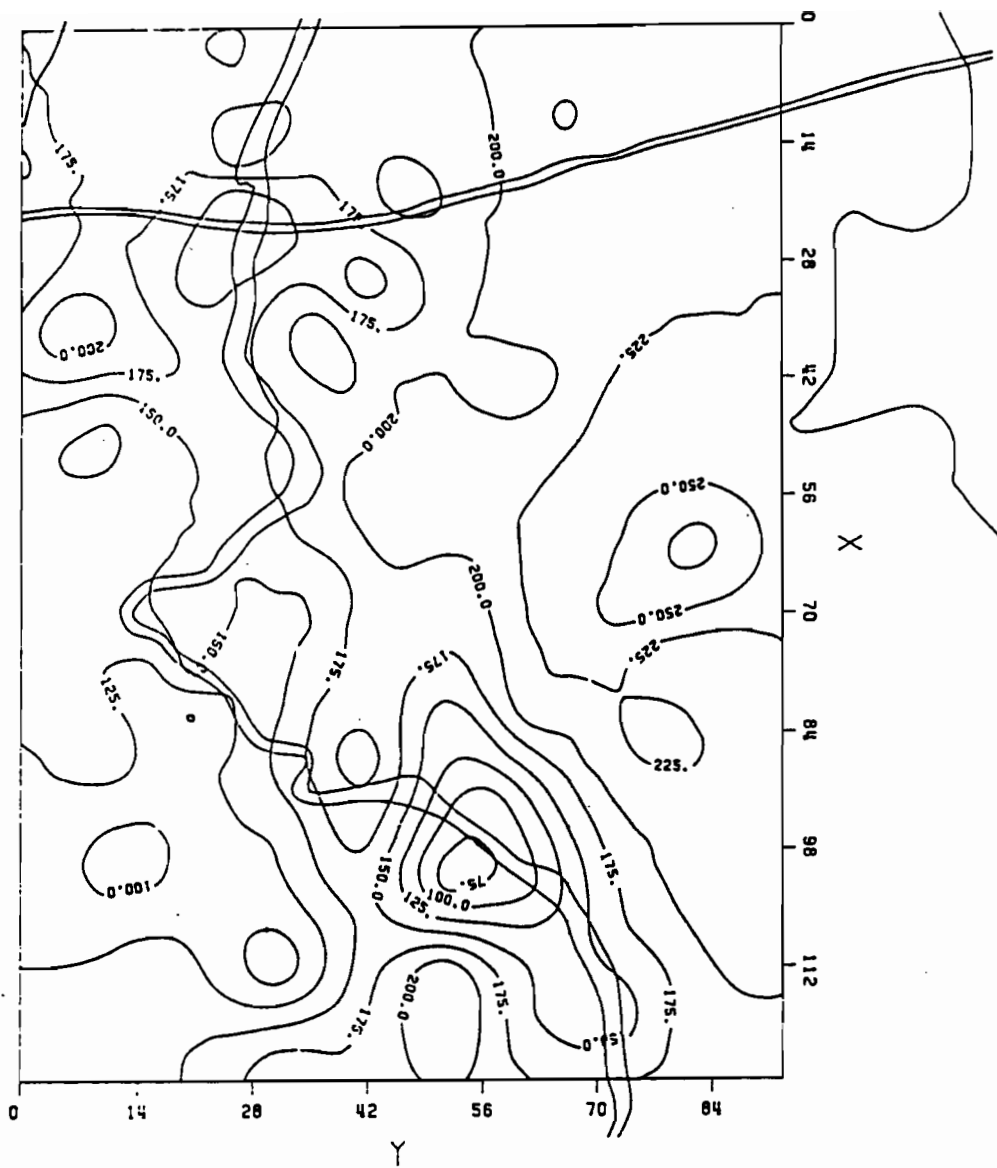


Fig. 2 : Site d'étude et dispositif

CARTE KRIGEE
Katoure



1 cm = 55m

LEGENDE :

ECHELLE : 1 / 5500

PARAMETRE : TOPOGRAPHIE

UNITE : CM

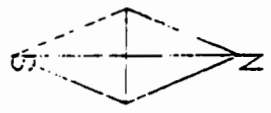


Fig. 3: Katourc: carte topographique

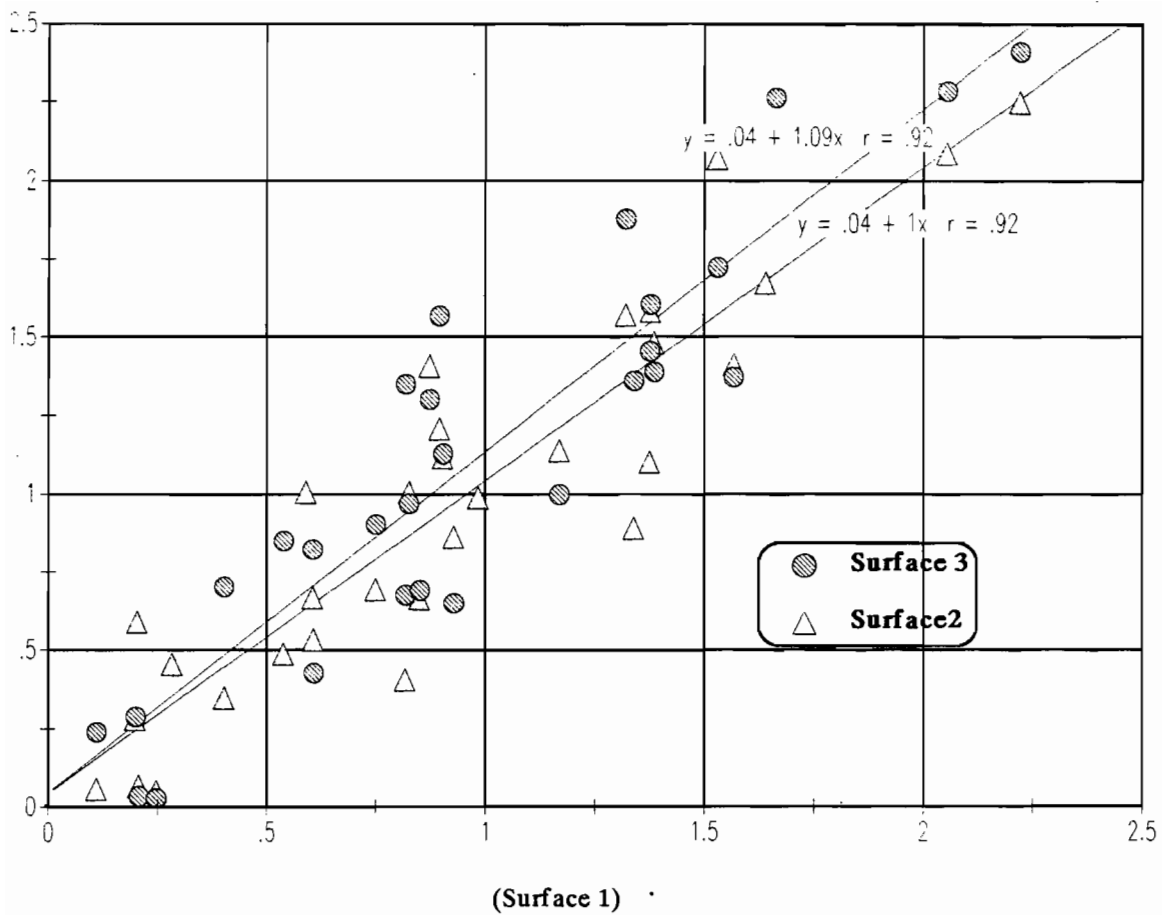


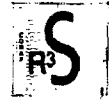
Figure 4: Parametre B (Philip, 1957) : Comparaison des valeurs obtenues pour différentes surfaces (dispositif à quatre anneaux emboités).



PIREN



CRSTOM



ACTION THEMATIQUE PROGRAMMEE

**INFLUENCE A L'ECHELLE REGIONALE DES COUVERTURES
PEDOLOGIQUES ET VEGETALES SUR LES BILANS
HYDRIQUES ET MINERAUX DES SOLS**

JUIN 1986 - JUIN 1989

RAPPORT FINAL

Edité par G. VACHAUD
Institut de Mécanique de Grenoble
Unité Mixte 101 (CNRS - Université Joseph
Fourier, Institut National Polytechnique de
Grenoble)
BP 53 X - 38041 GRENOBLE CX