

CN010100

BILAN HYDRIQUE ET MINERA. SOUS CULTURE
D'ARACHIDE ET DE MIL A
L'ECHELLE DE L'HECTARE

Par CISSE L., IMBERNON J. et DANCETTE Cl.

Janvier 1985.-

Document de Travail (*).

1. S. R. A.

DEPARTEMENT SYSTEMES ET TRANSFERT

CENTRE DE BAMBEY.-

Ce travail a été soumis pour publication à AGRONOMIE TROPICALE.-

REFERENCE : CISSE L., IMBERNON J. et DANCETTE Cl.

Bilan hydrique et minéral sous culture d'arachide et de mil
à l'échelle de l'hectare.

I.S.R.A., Département Systèmes et transfert, Document de travail
n° 1985 - 5. DAKAR, Janvier 1985.-

Les opinions exprimées dans les documents publiés dans la série
"document de travail" n'engagent que leurs auteurs.

I. - INTRODUCTION

L'alimentation hydrique et minérale est un facteur prépondérant dans l'élaboration des rendements des cultures de la zone soudano-sahélienne du Sénégal.

Beaucoup de travaux relatifs à l'estimation de l'évapotranspiration, du drainage et des pertes minérales par lixiviation sous cultures ont été réalisés au Sénégal, notamment par C. DANCETTE (1, 2), C. CHARREAU, A. CHAUVEL (3) et C. PIERI (4). Cependant, basés sur une ou quelques verticales de mesures, ils ont permis de déterminer des valeurs que l'on peut difficilement extrapoler à l'échelle d'un champ cultivé. Le sol qui joue le rôle de réservoir hydrique et minéral pouvant être très hétérogène, il doit par conséquent être considéré dans l'ensemble de son hétérogénéité si l'on s'intéresse à l'échelle d'espace qu'est la parcelle cultivée.

Une expérimentation conduite de 1978 à 1981 au Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey, au Sénégal, dont on présente ici les résultats a été axée sur l'estimation de grandeurs spatialement représentatives, consommation hydrique des cultures, pertes en eau et en éléments minéraux par drainage. Dans cette optique, on a d'abord procédé à une caractérisation de la structure spatiale des principaux paramètres physiques et hydriques qui régissent la dynamique de l'eau et des éléments minéraux.

Cette approche spatiale a déjà fait l'objet de plusieurs travaux parmi lesquels on peut citer ceux de D.R. NIELSEN et A.W. WARRICK (5) et de A.J. PECK et al. (6). Elle permet d'estimer de façon appropriée les valeurs moyennes des paramètres étudiés à l'échelle d'un champ d'un ou de plusieurs hectares.

Enfin un calcul comparatif des flux de drainage sous arachide obtenus d'une part par l'utilisation de la loi de Darcy généralisée et d'autre part par la méthode de la variation du stock hydrique a été fait: ainsi que l'établissement d'un bilan minéral tenant compte des divers apports (engrais, eaux de pluie), des exportations par les récoltes et des pertes par lixiviation.

II. - METHODES D'ETUDE

21. • Dispositif expérimental

Il a été implanté sur un sol sableux (sol ferrugineux tropical peu lessivé, appelé localement sol Dior) très caractéristique de la zone Centre-Nord du Sénégal où il représente 80 % des sols cultivés.

Une parcelle d'environ un hectare a été découpée en 18 mailles tirées 23 m x 23 m dans lesquelles l'étude de la variabilité spatiale des paramètres physiques et hydrodynamiques a été faite d'octobre 1978 à juin 1979 sur sol nu.

Ensuite, à l'intérieur de ces mailles ont été délimitées des sous-parcelles de 20 m x 20 m pour l'étude des termes du bilan hydrique et minéral. 18 des 18 sous-parcelles ont été équipées chacune de la façon suivante :

211. Saison des pluies 1979

Au Centre, ont été installés un tube d'accès pour humidimètre à neutrons, à 360 cm de profondeur et des tensiomètres placés à 100, 110 et 120 cm.

Une double série de cellules de prélèvement de solution du sol (type Soil Moisture, réf. 1900) localisées à 30, 60 et 110 cm de profondeur, a été implantée de part et d'autre du tube neutron.

212. Saison des pluies 1980 et 1981

Deux cellules de prélèvement de solution du sol supplémentaires ont été installées à 180 cm de profondeur pour le calcul des transferts minéraux sous mil au-delà de cette cote.

En 1979, les sous-parcelles ont été cultivées en arachide et en 1980 et 1981 en mil Souma. Les variétés et les doses d'engrais appliquées sont présentées au tableau I.

22. - Mesures et méthodes de calcul

221. Mesures

Avec le maillage réalisé on a ainsi obtenu un réseau de 78 noeuds sur lequel, entre octobre 1978 et juin 1979 :

- on a effectué en chaque noeud une caractérisation de la texture du sol par la détermination du taux d'éléments fins inférieurs à 20 μ m (taux d'argile + limon) par tranche de 10 cm de sol jusqu'à 120 cm de profondeur.

- sur quatre noeuds choisis pour leur représentativité en teneurs en éléments fins, on a réalisé un monolithe de sol de 1,5 m x 1,5 m, isolé latéralement jusqu'à 150 cm de profondeur par une feuille de polyane. Sur chaque monolithe, on a installé un tube neutron jusqu'à 200 cm et 10 tensiomètres aux cotes 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110, 130 et 150 cm. On a effectué des essais de caractérisations hydro-dynamiques avec infiltration d'une lame d'eau de 4 cm sur toute la surface du monolithe, suivi du volume infiltré dans un anneau de 60 cm de diamètre et de la redistribution.

- sur les 24 noeuds restants, on a implanté un tube neutron à 200 cm et trois tensiomètres à 100, 110 et 120 cm de profondeur. Des essais d'infiltration sur deux anneaux concentriques de 60 cm et 120 cm de diamètre ont été réalisés avec une lame d'eau constante de 4 cm. On a mesuré le volume d'eau infiltré dans l'anneau intérieur centré sur le tube neutron et on a suivi le drainage interne.

<u>Année</u>	<u>Culture</u>	<u>Date de semis</u>	<u>Variété (cycle)</u>	<u>Fertilisation minérale</u>
1979	Arachide	11 juin 1 ^{er}	73-30 (90 j)	150 kg/ha de 8-18-27 au semis
1980	Mil	7 août	Souna III(90 j)	150 kg/ha de 10-21-21 au semis + 150 kg/ha de sulfate d'ammoniaque au 27 ^e et au 41 ^e jour après le semis
1981	Mil	5 juillet	Souna III(90 j)	150 kg/ha de 10-21-21 au semis + 50 kg/ha d'urée au 27 ^e et au 41 ^e jour après le semis

Tableau I : Cultures, dates de semis, variétés et doses d'engrais appliquées en 1979, 1980 et 1981

<u>Sous-parcelles</u>	<u>Arachide (1979)</u>		<u>Mil (1980)</u>		<u>Mil. (1980)</u>	
	ETR (mm)	D (mm) Z= 110 cm	ETR (mm)	D (mm) Z= 180 cm	ETR (mm)	D (mm) Z= 180 cm
1	333,0	38,3	287,7	57,1	340,0	33,4
2	374,0	21,6	310,4	25,3	367,4	ε
3	329,0	54,8	284,2	48,0	336,9	26,2
4	364,0	1,2	352,5	ε	402,1	ε
5	388,0	ε	348,6	ε	412,4	ε
6	387,0	4,3	374,0	16,6	312,2	32,7
<u>Moyenne</u>	<u>362,5</u>	<u>20,0</u>	<u>326,2</u>	<u>24,5</u>	<u>361,8</u>	<u>15,4</u>
Ecart-type	25,99	22,57	37,35	23,99	39,42	17,03
Pluviométrie totale	472,3 mm		396,1 mm		547,8 mm	
Pluviométrie cycle	358,0 mm		389,0 mm		516,8 mm	

Tableau II : Valeurs de l'ETR et du drainage (D)
 ε : valeur très faible (prise égale à 0,01 pour le calcul de la moyenne arithmétique)
 Pluviométrie cycle : pluviométrie (semis- récolte)

Au centre des six sous-parcelles, on a déterminé, par tranche de 10 cm de sol, le taux d'argile + limon, jusqu'à 360 cm de profondeur.

Pendant la période de culture, les relevés tensionométriques ont été faits tous les jours et les profils hydriques ont été mesurés, en moyenne, chaque semaine. Les prélèvements de la solution du sol ont été également faits environ chaque semaine par création 3 l'intérieur des cellules d'un vide de 600 mb grâce à une pompe à vide manuelle. La solution du sol est recueillie, après une nuit, au cours de laquelle les cellules fonctionnent à pression décroissante; elle est ensuite filtrée et conservée en chambre froide jusqu'au moment de l'analyse chimique. Sa teneur en Ca, Mg, K et Na est déterminée par émission et absorption atomique et celle en azote (ni traitée) par colorimétrie.

222. Méthodes de calcul

L'évapotranspiration moyenne journalière ($\overline{ETR}$) est estimée à partir du calcul de l'ETR hebdomadaire obtenue par la relation : $ETR = P - (D + AS)$

avec: P : pluviométrie de la semaine considérée

D : drainage à la côte Z pendant cette semaine

AS : variation hebdomadaire du stock hydrique entre 0 et la côte Z

Pour s'affranchir du calcul de D, la côte Z est choisie de telle façon que l'on soit au-delà du front racinaire et qu'en outre l'humidité du sol soit constante dans le temps et suffisamment faible pour que la conductivité hydraulique soit quasiment nulle.

Le drainage sous arachide, à la côte 110 cm, et sous mil, 3 180 cm est calculé par la méthode de la variation de stock entre la côte de référence et la dernière côte de mesure (Z = 360 cm). En 1979, sous culture d'arachide, il a été également calculé en appliquant la loi de Darcy généralisée. La conductivité hydraulique a été alors calculée par la relation mise en évidence par J. IMBERNON (7) à partir du taux d'argile + limon à Z = 110 cm. Cette relation s'exprime ainsi :

$$K = K_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^\beta$$

$$K_0 \text{ (cm/h)} = 28,42 - 1,534 (A + L)$$

$$\beta = 3,67 + 0,437 (A + L)$$

$$\theta = \text{teneur en eau volumique (cm}^3\text{/cm}^3\text{)}$$

$$\theta_0 = \text{teneur en eau volumique à saturation}$$

Les flux massiques aux côtes de référence sont calculés par la relation

$$q_{mx} = q_h \times C_x$$

$$q_{mx} = \text{flux massique de l'élément x}$$

$$q_h = \text{flux hydrique}$$

$$C_x = \text{concentration de l'élément x}$$

III. - RESULTATS ET INTERPRETATION

31. - Analyse spatiale des principaux paramètres physiques et hydrodynamiques

311. Texture du sol

L'histogramme des fréquences relatives du taux moyen (A + L) dans la tranche 0 - 110 cm est présenté à la figure 1a. La courbe lissée montre que ce paramètre a une loi de distribution dissymétrique, de type log-normale dont la moyenne et l'écart-type sont respectivement :

$$m_{\log(A + L)} = 0,868 \text{ et } \sigma_{\log(A + L)} = 0,120$$

La structure spatiale caractérisée par son variogramme (fig. 1b) montre une indépendance des points de mesures distants d'au moins de 23 mètres.

312. Teneur en eau du sol et charges hydrauliques

L'analyse des lois de distribution de ces paramètres est basée sur la distribution des fréquences cumulées. A la figure 2a sont présentées celles des humidités en régime permanent d'infiltration, après 5 jours et 18 jours de ressuyage et au point de flétrissement à $Z = 110$ cm. A la figure 2b, on a représenté la distribution de fréquences des charges hydrauliques après 5 jours et 18 jours de redistribution à la côte $Z = 110$ cm.

L'ajustement des points obtenus à des droites montre que ces paramètres sont normalement distribués.

313. Vitesse d'infiltration permanente (K_o)

Les paramètres statistiques de la loi de distribution de K_o à la côte $Z = 110$ cm sont :

Moyenne =	24,5	Médiane =	24,0
Ecart-type =	4,6	Aplatissement =	25,9
Coefficient; de variation =	18,7 %	Assymétrie =	1,08
Mode =	23,2		

De ces valeurs on en déduit que la vitesse d'infiltration permanente suit une loi de distribution log-normale.

2. - Bilan hydrique

Si parmi les deux termes du bilan hydrique sous culture calculés, l'ETR ne pose aucun problème particulier, le calcul du drainage par contre soulève celui des valeurs négatives obtenues au cours de certaines périodes du cycle de la plante. Ces valeurs ont été trouvées en utilisant la méthode de la variation de stock hydrique entre la cote de Référence et la dernière cote de mesure. On a alors recalculé le drainage sous arachide par la loi de Darcy généralisée et par la relation $D = P - (ETR + \Delta S)$, et sous mil uniquement par cette dernière relation parce qu'on ne dispose pas de mesures tensiométriques encadrant la cote $Z = 180$ cm.

Ces différentes méthodes confirment l'existence de ces valeurs négatives qui apparaissent essentiellement sous arachide, à partir du 40^{ème} jour après le semis, sauf pour la sous-parcelle 5 (30^{ème} jour après semis), et sous mil en début de cycle (10 jours après semis) et à partir du 50^{ème} jour après semis.

Les travaux effectués par J.L. CHOPART (8) sur l'enracinement de l'arachide et du mil dans les sols sableux du Sénégal ont montré que le système racinaire de l'arachide atteint sa profondeur maximale 50 jours après le semis et que celle-ci peut alors se situer à la cote $Z = 150$ cm.

La vitesse d'enracinement qui est de 5 cm/j jusqu'au 7^{ème} jour après le semis et de 2,5 cm/j du 7^{ème} au 50^{ème} jour permet d'avancer que la cote $Z = 110$ cm peut être atteinte par le système racinaire de l'arachide 35 jours après le semis. On peut donc supposer que les valeurs négatives obtenues à partir de cette période proviennent de l'extraction racinaire.

Le système racinaire du mil, toujours d'après CHOPART, peut descendre jusqu'à la cote $Z = 180$ cm, cote atteinte à la fin du cycle de la plante. Les mesures de densité et d'extraction racinaires par tranche de sol qu'on a effectuées en 1981 ont montré cependant que vers la fin du mois d'août (58 jours après semis), des racines étaient présentes à 180 cm de profondeur et présentaient une certaine activité bien que celle-ci soit beaucoup plus faible que celle des racines de la couche 0 - 50 cm. Il est donc probable que les valeurs négatives obtenues en fin de cycle soient dues aux prélèvements racinaires du mil.

Les autres valeurs négatives qui apparaissent en début de cycle ou à des périodes où le système racinaire n'a pas encore atteint la cote de référence et qui coïncident généralement à des périodes de sécheresse pouvant s'étaler sur 15 jours ou plus, sont supposées dues, bien que ce phénomène soit très rare dans les sols sableux, à des remontées capillaires. Ces valeurs sont plus importantes dans les sous-parcelles 2, 4, 5 et 6 à taux d'éléments fins en profondeur plus élevés que dans les sous-parcelles 1 et 3.

Pour le calcul du drainage cumulé, on a utilisé finalement la méthode de variation du stock hydrique et le cumul a été fait en tenant compte de toutes les valeurs positives et négatives (cumul algébrique).

321. Arachide (1979)

Les lames d'eau évapotranspirées et drainées à 110 cm sont présentées au tableau II.

On observe une faible variabilité de l'ETR ($C_v = 7,2 \%$). Par contre, le drainage présente une très importante variabilité ; les sous-parcelles les moins drainantes 4, 5 et 6 présentent les taux d'A + L à 110 cm les plus élevés (11,5 - 8 et 10,8 % respectivement). Les sous-parcelles 1 et 3 à taux d'A + L à 110 cm égal à 4,8 et 4,7 % présentent les valeurs de drainage les plus élevées. Au tableau III sont présentés les paramètres de la corrélation mise en évidence entre le drainage à 110 cm et le taux d'A + L à cette même cote ; dans ce calcul ϵ est pris égal à 0,01.

322. Mil (1980 et 1981)

Les valeurs de l'ETR et du drainage à $Z = 180$ cm pour les deux années sont aussi présentées au tableau II. On observe une faible variation de l'ETR, 11,4 % et 10,9 % de coefficient de variation respectivement pour 1980 et 1981. Les valeurs moyennes de l'ETR sont assez proches de celle obtenue sous arachide.

Le drainage des six sous-parcelles présente les mêmes caractéristiques que celles observées sous arachide : percolations plus grandes sous les sous-parcelles 1 et 3 et plus faibles dans 4 et 5. Pour la sous-parcelle 6, par suite d'une forte pluie (159 mm) tombée le 12/9/81 et qui a produit des percolations importantes à la dernière cote de mesure, le calcul du drainage en 1981 a été arrêté le 1/9/81.

On met en évidence, en 1980, une corrélation significative entre le drainage à $Z = 180$ cm et le taux d'A + L à cette même cote (tableau III). L'absence de corrélation significative, en 1981, entre ces deux paramètres résulterait du comportement singulier de la sous-parcelle 6. En effet, la corrélation, si on considère les 5 sous-parcelles, est significative, $r = 0,860^*$.

<u>Culture (année)</u>	<u>Equations de régression</u>	<u>Coefficient de corrélation</u>
Arachide (1979)	$D = -6,87(A+L) + 74,77$	$r = 0,874^*$
Mil (1980)	$D = -7,46(A+L) + 98,97$	$r = 0,901^*$

Tableau III : Corrélation entre le drainage sous culture et le taux d'A + L à 110 cm pour l'arachide et 180 cm pour le mil

* significatif à 5 % - ($\epsilon = 0,01$ pour le calcul de r)

33. - Pertes minérales par lixiviation

L'utilisation des cellules de prélèvement de la solution du sol a été l'objet de plusieurs travaux parmi lesquels on peut citer ceux de T. TALSMAN et al. (9), de M.J. LEVIN et al. (10) et de E.A. HANSEN et al. (11).

F. TALSMA et al. ont montré que le volume d'eau recueilli à partir des bougies poreuses pouvait être beaucoup plus stable que celui que la conductivité hydraulique des bougies et les paramètres du sol relatifs aux transferts hydriques permettraient de recueillir. Cette différence proviendrait, selon eux, de la diminution de la conductivité hydraulique du sol le long des parois des bougies ; l'installation de celles-ci ayant compacté le sol à leur voisinage immédiat. Ils ont également observé en mesurant, avant et après expérimentation, la conductivité hydraulique des bougies poreuses que celle-ci avait beaucoup décru après un séjour de 8 semaines dans le sol. Ils ont attribué cette décroissance au colmatage des pores.

M. J. LEVIN et al. ont comparé trois méthodes d'extraction de la solution du sol : bougie poreuse, fibre creuse et percolation simple. L'analyse de la concentration de la solution du sol en Ca, Mg, N (NO_3) et P (PO_4) obtenue avec ces trois méthodes leur a permis de conclure que les bougies poreuses permettaient de recueillir des solutions dont les teneurs en Ca et en Mg sont représentatives de la solution du sol. En ce qui concerne l'azote, ils ont observé un biais qui résulterait d'après eux d'un tamisage qu'opèreraient les bougies.

L'étude de A. HANSEN et al. sur les facteurs physiques (conductivité hydraulique, tamisage, colmatage et diffusion) et chimiques (sorption, libération d'ions par les bougies) qui pourraient affecter le volume et la concentration de la solution prélevée montre que le colmatage des pores qui réduit très significativement la vitesse d'entrée de l'eau dans les bougies est une importante source de variation de la concentration de la solution recueillie. Le tamisage et surtout la sorption affecteraient selon eux la concentration en phosphore ; celle-ci serait plus faible que la teneur en P de la solution ambiante. Pour l'azote, ils n'ont observé aucun biais significatif.

Au cours des travaux ici présentés, on a observé une grande variabilité du volume d'eau prélevé à l'aide des cellules de prélèvement. Et pendant certaines périodes de drainage important, les volumes d'eau recueillis apparaissent faibles bien que suffisants pour permettre de faire les analyses chimiques. Cependant, on n'a pas trouvé de corrélation significative entre les volumes d'eau prélevés et les concentrations de la solution.

Les résultats obtenus avec les cellules utilisées et comparés à ceux fournis par les cases lysimétriques, (on y reviendra dans la discussion) nous permettent de dire que, si l'on prend certaines précautions (prétrempage dans de l'eau distillée avant placement, installation sans tassement du sol, retrait après chaque campagne de mesures), les cellules de prélèvement sont des outils appropriés dans les sols sableux type Dior pour estimer les pertes par lixiviation en N (NO_3), Ca, Mg et K.

331. Pertes minérales par lixiviation sous arachide

Les pertes minérales calculées sous-parcelle par sous-parcelle montrent une grande variabilité spatiale (tableau cv). On observe l'existence de deux groupes, un premier présentant des pertes assez importantes (sous-parcelles 1, 2 et 3) et un deuxième où les pertes sont très faibles à nulles (sous-parcelles 4, 5 et 6).

L'analyse **de ces résultats** montre une corrélation significative entre le taux d'argile + limon à la côte 110 cm et Les pertes minérales (tableau V). Les sous-arcelles 1 et 3 à taux d'argile + limon les plus faibles (respectivement 4,8 et 4,7 %) présentent les pertes Les plus élevées.

Les pertes en azote et en calcium (Ca 0) peuvent être très importantes et atteindre respectivement 50 kg/ha (N - NO₃) et 40 kg/ha ; par contre, celles en K₂O **sont** très faibles, elles ne dépassent pas 3 kg/ha.

Pertes minérales par lixiviation (kg/ha)				
<u>Sous-parcelles</u>	<u>N - NO₃</u>	<u>Ca 0</u>	<u>M g</u>	<u>K₂ O</u>
1	29,8	27,7	11,1	3,3
2	11,9	12,3	6,3	0,9
3	52,1	44,1	17,0	2,4
Moyenne	31,3	28,0	11,5	<u>2,2</u>
Ecart-type	20,1	15,9	5,3	1,2
Sous parcelles				
4	ε	ε	ε	ε
5	ε	ε	ε	ε
6	2,5	5,2	3,0	0,5

Tableau IV : Pertes minérales sous arachide (1979)
ε : valeur très faible

<u>Variables</u>	<u>Equations de régression</u>	<u>Coefficients de corrélation (r)</u>
N _L x A + L	N _L = 6,25 (A+L) + 65,91	- 0,854 [*]
CaO _L x A + L	CaO _L = -5,26 (A+L) + 56,88	- 0,855 [*]
MgO _L x A + L	MgO _L = -1,99 (A+L) + 22, 10	- 0,846 [*]
K ₂ O _L x A + L	K ₂ O _L = -0,41 (A+L) + 4,45	- 0,861 [*]

Tableau V : Corrélations entre pertes minérales par lixiviation et taux d'A + L à 110 cm

^{*} : significatif à 5 % ε = 0,01 pour le calcul de r.

III. Pertes minérales par lixiviation sous mil

On observe en 1980, comme sous arachide, une importante variabilité spatiale des pertes minérales et l'existence des deux mêmes groupes de sous-parcelles qui se distinguent de par leurs valeurs de pertes par lixiviation (tableau VI).

On met également en évidence des corrélations significatives entre les pertes minérales et les taux d'argile + limon à 180 cm de profondeur (tableau VII). Les sous-parcelles 1 et 3, dont les taux d'argile + limon sont les plus faibles et s'élèvent respectivement, à la cote 180 cm, à 5,8 et 7,8 %, présentent les pertes les plus élevées.

<u>Pertes minérales par lixiviation (kg/ha)</u>				
<u>Sous-parcelles</u>	<u>N - NO₃</u>	<u>Ca O</u>	<u>Mg O</u>	<u>K₂ O</u>
1	23,1	29,0	14,6	4,2
2	16,8	20,3	11,9	1,3
3	21,3	29,1	17,2	2,7
Moyenne	<u>20,4</u>	<u>26,1</u>	<u>14,6</u>	<u>2,7</u>
Ecart-type	3,2	5,1	2,6	1,4
<u>Sous-parcelles</u>				
4	ε	ε	ε	ε
5	ε	ε	ε	ε
6	3,7	5,6	3,0	1,2

Tableau VI : Pertes minérales par lixiviation sous mil (1980)

ε : valeur très faible

<u>Variables</u>	<u>Equations de régression</u>	<u>Coefficient de corrélation (r)</u>
N _L x A + L	N _L = -3,24 (A+L) + 43,19	- 0,872*
CaO _L x A + L	CaO _L = - 4,15 (A+L) + 55,46	- 0,871*
MgO _L x A + L	MgO _L = - 2,21 (A+L) + 29,89	- 0,834*
K ₂ O _L x A + L	K ₂ O _L = - 0,51 (A+L) + 6,62	- 0,899*

Tableau VII : Corrélations entre pertes minérales par lixiviation sous mil (1980) et taux d'A + L à 180 cm

* : significatif à 5 % - ε = 0,01 pour le calcul de r

x_L: quantité de x lixiviée

En 1981, les pertes minérales obtenues sont dans l'ensemble très faibles, comme le montrent les valeurs présentées au tableau VIII. Il n'y a pas, probablement à cause des valeurs très faibles, de corrélations significatives entre les pertes et le taux d'argile + limon à la côte de référence.

Si on considère d'une part **les totaux** pluviométriques des deux années 1980 et 1981 qui sont respectivement de 396,1 et 547,8 mm, et d'autre part les pertes par lixiviation obtenues au cours de ces deux années, il apparaît que le facteur pluviométrie totale n'est pas très influent sur les pertes par lixiviation.

Pertes minérales par lixiviation (kg/ha)				
<u>Sous-parcelles</u>	<u>N - NO₃</u>	<u>Ca O</u>	<u>Mg O</u>	<u>K₂ O</u>
1	1,1	3,8	0,9	0,6
2	ε	ε	ε	ε
3	0,1	2,7	0,5	0,2
4	ε	ε	ε	ε
5	ε	ε	ε	ε
6	2,8	12,0	4,6	0,8
Moyenne	<u>0,7</u>	<u>3,1</u>	<u>1,0</u>	<u>0,3</u>
Ecart-type	1,1	4,7	1,8	0,3

Tableau VIII : Pertes minérales par lixiviation sous mil (1981)

ε: valeur très faible (prise égale à 0,01 pour le calcul de la moyenne arithmétique)

34. - Bilan minéral de la succession arachide - mil - mil

Les rendements en gousses et fanes pour l'arachide **et** en grains et pailles pour le mil sont présentés au tableau IX.

<u>Sous parcelles</u>	<u>Arachide (1979)</u>		<u>Mil (1980)</u>		<u>Mil (1981)</u>	
	<u>Gousses (kg/ha)</u>	<u>Fanes (kg/ha)</u>	<u>Grains (kg/ha)</u>	<u>Pailles (kg/ha)</u>	<u>Grains (kg/ha)</u>	<u>Pailles (kg/ha)</u>
1	685	1834	2464	5509	1933	2994
2	900	2100	2161	7269	1647	4151
3	667	1518	2277	6281	1714	4259
4	1085	1730	1908	5108	1863	5802
5	1000	1370	2059	6034	1935	3441
6	1057	1424	2387	4907	1815	4367
Moyenne	899	<u>1663</u>	<u>2209</u>	<u>5851</u>	<u>1818</u>	<u>4169</u>
c v (%)	20,5	16,8	9,4	14,9	6,4	23,1

Tableau LX : Rendements de l'arachide (1979) et du mil (1980 et 1981)

Les rendements en gousses sont faibles (moins d'une tonne de moyenne) et ceux en mil grains moyens (2 t/ha en moyenne) pour des variétés dont les potentiels sont respectivement de 2 t/ha et de 3 t/ha.

Le bilan minéral apparent de la succession arachide - mi 1 - mi 1 est présenté au tableau X. Il a été calculé par la formule : $B = A - (E + L)$ où A représente les apports (engrais), E les exportations par les récoltes et L les pertes par lixiviation. Si on tient compte d'une part de l'azote fixé par l'arachide qui, dans les conditions de culture de la zone Centre - Nord du Sénégal, peut représenter 70 % de l'azote total exporté par la plante et d'autre part des apports par les eaux pluies qui, d'après les travaux de C. PIERI (12), peuvent s'élever pour les trois années à : 1,3 kg/ha d'azote, 3,1 kg/ha de P_2O_5 , 12,3 kg/ha de K_2O , 48,8 kg/ha de CaO et 12,2 kg/ha de MgO , le bilan minéral à l'échelle de la parcelle cultivée est :

N =	- 39,8 kg/ha
P_2O_5 =	+ 32,6 kg/ha
K_2O =	- 46,2 kg/ha
Ca O =	- 51,0 kg/ha
Mg O =	- 121,6 kg/ha

On peut observer au tableau X que le bilan minéral présente une variabilité qui permet de l'analyser en fonction des deux groupes de sous-parcelles mises en évidence.

341. Bilan de N

Il se présente comme suit en fonction des deux groupes de sous-parcelles

S P ₁ :	- 61,6 kg/ha	S P ₄ :	- 12 kg/ha
S P ₂ :	- 54,0 kg/ha	S P ₅ :	- 15,3 kg/ha
S P ₃ :	- 89,0 kg/ha	S P ₆ :	- 11,6 kg/ha
Moyenne:	<u>- 68,2 kg/ha</u>	Moyenne:	<u>- 11,6 kg/ha</u>
Ecart-type	18,5 kg/ha	Ecart-type:	3,9 kg/ha

Le bilan azoté s'élève en moyenne à - 68 kg/ha pour les sous-parcelles 1, 2, 3 et : à - 12 kg/ha pour les trois autres. Le déficit est de 57 kg/ha plus élevé pour les premières que pour les secondes. Les exportations moyennes par les récoltes sont respectivement de 164 kg/ha (CV = 5,3 %) et de 157 kg/ha (CV = 5,7 %). Il apparaît ainsi que la différence provient essentiellement des pertes par lixiviation beaucoup plus importantes dans le premier que dans le second groupe.

Apports (engrais)	Arachide (1979)						Mil (1980)						Mil (1981)					
	SP ₁	2 SP	SP ₃	SP ₄	SP ₅	SP ₆	SP ₁	SP ₂	SP ₃	SP ₄	SP ₅	SP ₆	SP ₁	SP ₂	SP ₃	SP ₄	SP ₅	SP ₆
N (kg/ha)	12	12	12	12	12	12	75	75	75	75	75	75	60	60	60	60	60	60
P ₂ O ₅ (kg/ha)	27	27	27	27	27	27	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5
K ₂ O (kg/ha)	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5
CaO (kg/ha)	0	0	0	0	0	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
MgO (kg/ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exportations (cultures)																		
N (kg/ha)	80,3	97,2	71,0	95,5	82,0	86,0	89,4	101,6	97,9	59,6	75,6	73,7	42,4	42, a	44,7	72,1	63,4	47,3
P ₂ O ₅ (kg/ha)	14,2	17,4	12,8	17,8	15,5	16,3	27,6	27,9	36,9	16,2	17,9	21,0	19,5	18,7	18,0	21,5	22,8	20,9
K ₂ O (kg/ha)	36,7	36,3	26,4	33,4	27,8	29,1	110,4	93,0	113,7	89,0	103,3	83,2	34,5	21,0	20,0	48,8	28,0	19,4
CaO (kg/ha)	22,8	26,1	18,9	21,8	17,4	18,1	35,1	40,3	54,0	22,7	31,8	19,0	10,8	15,7	12,1	24,1	18,9	15,7
MgO (kg/ha)	13,0	15,3	11,1	13,7	11,2	11,7	57,4	89,8	82,6	62,1	76,8	56,9	26,1	30,2	32,4	47,3	41,5	33,6
Pertes par lixiviation																		
N (kg/ha)	29, a	11,9	52,1	0	0	2,5	23,1	16,8	21,3	0	0	3,7	1,1	0	0,1	0	0	2,8
P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8
K ₂ O (kg/ha)	3,3	0,9	2,4	0	0	0,5	4,2	1,3	2,7	0	0	1,2	0,6	0	0,2	0	0	0,8
CaO (kg/ha)	27,7	12,3	44,1	0	0	5,2	29	20,3	29,1	0	-0	5,6	3,8	0	2,7	0	8	12,0
MgO (kg/ha)	11,1	6,3	17,0	0	0	3,0	14,6	11,9	17,2	0	0	3,0	0,9	0	0,5	0	0	4,6

BILAN TRIENNAL (kg/ha)

Eléments	SP ₁	SP ₂	SP ₃	SP ₄	SP ₅	SP ₆	$\bar{X} \pm \sigma$
N	- 119,1	- 123,3	- 140,1	- 80,2	- 74,0	- 69,0	- 100,9 $\pm$ 30,1
P ₂ O ₅	+ 28,7	+ 26,0	+ 22,3	+ 34,5	+ 33,8	+ 31,8	+ 29,5 $\pm$ 4, a
K ₂ O	- 86,2	- 49,0	- 61,9	- 67,7	- 55,6	- 30,7	- 58,5 $\pm$ 18,6
CaO	- 126,2	- 111,7	- 157,9	- 65,6	- 65,1	- 72,6	- 99,8 $\pm$ 38,3
MgO	- 123,1	- 153,5	- 160,8	- 123,1	- 129,5	- 112,8	- 133,8 $\pm$ 19,0

Tableau X : Bilan minéral de la succession arachide - mil - mil
 σ : écart-type+ - SP : sous parcelle

343. Bilan de K₂O

Il est en moyenne de + 28,8 kg/ha (CV = 11,1 %) pour les trois premières et de + 36,5 kg/ha (CV = 3,8 %) pour les trois dernières.

Les pertes par lixiviation étant nulles, la faible différence observée résulte des exportations par les récoltes légèrement supérieures pour le premier groupe.

343. Bilan de K₂O

Il se décompose ainsi entre les deux groupes de sous-parcelles :

s P ₁ : - 73,9 kg/ha	s P ₄ : - 55,4 kg/ha
s P ₂ : - 36,7 kg/ha	S P ₅ : - 43,3 kg/ha
S P ₃ : - 49,6 kg/ha	S P ₆ : - 18,4 kg/ha
Moyenne : - 53,4 kg/ha	Moyenne : - 39,0 kg/ha
Ecart-type: 18,9 kg/ha	Ecart-type: 18,9 kg/ha

Le déficit du bilan potassique est de 14,4 kg/ha plus important pour les sous-parcelles 1, 2, 3 que pour les trois dernières. Les exportations moyennes de K₂O par les récoltes sont respectivement pour ces deux groupes de 164 kg/ha (CV = 10 %) et de 154 kg/ha (CV = 13,1 %). Les pertes moyennes par lixiviation sont de 5,2 kg/ha pour les premières et de 0,8 kg/ha pour les secondes. La différence dans ce bilan comparé provient de 10 kg/ha des exportations par les récoltes et de 4,4 kg/ha des pertes par lixiviation. On remarque cependant que l'écart de 14,4 kg/ha se retrouve également entre sous-parcelles d'un même groupe, par conséquent le bilan potassique des sous-parcelles 1, 2 et 3 n'est pas significativement différent de celui des trois autres.

344. Bilan de CaO

La décomposition de ce bilan entre les deux groupes de sous-parcelles donne :

s P ₁ : - 77,4 kg/ha	s P ₄ : - 16,8 kg/ha
s P ₂ : - 62,9 kg/ha	S P ₅ : - 16,3 kg/ha
S P ₃ : -109,1 kg/ha	S P ₆ : - 23,8 kg/ha
Moyenne : - 83,1 kg/ha	Moyenne : - 19,0 kg/ha
Ecart-type: 23,6	Ecart-type: 4,2

Les exportations moyennes de Ca O par les récoltes sont de 78,6 kg/ha (CV = 11 %) et de 63,2 kg/ha (CV = 14 %) respectivement pour les sous-parcelles 1, 2, 3 et 4, 5, 6. Il apparaît donc que le déficit du bilan plus élevé dans le premier groupe résulte essentiellement des pertes par lixiviation plus importante dans celui-ci.

345. Bilan de Mg O

Il se décompose en fonction des deux groupes en :

s P ₁ :	- 110,9 kg/ha	s P ₄ :	- 110,9 kg/ha
s P ₂ :	- 141,3 kg/ha	s P ₅ :	- 117,3 kg/ha
s P ₃ :	- 148,6 kg/ha	s P ₆ :	- 100,6 kg/ha
Moyenne :	- 133,6 kg/ha	Moyenne :	- 109,6 kg/ha
Ecart-type :	20,0	Ecart-type :	8,4

Les récoltes ont exporté en moyenne 119,3 kg/ha (CV = 17 %) et 118,3 kg/ha (CV = 12 %) dans les deux groupes respectifs. La différence de 24 kg/ha entre les bilans des deux groupes de sous-parcelles résulte donc des pertes par lixiviation plus élevées dans les premières que dans les trois dernières sous-parcelles. Mais dans chaque groupe, les exportations par les récoltes et surtout par le mil représentent la partie la plus importante dans le déficit du bilan du magnésium.

35. Estimation comparée du drainage par application de la loi de Darcy généralisée et par la méthode de variation du stock hydrique

Par manque de tensiomètres encadrant la côte 180 cm, le calcul comparatif du drainage par application de la loi de Darcy généralisée et par la méthode de la variation du stock hydrique a été fait sous arachide à la côte Z = 110 cm.

Les lames d'eau drainées cumulées, calculées pendant la période allant du semis (Le 11/7) à la récolte (23/10) sont représentées à La figure 3.

L'application de la Loi de Darcy généralisée donne en moyenne des valeurs légèrement plus élevées que celles obtenues par la méthode de la variation du stock hydrique. L'accord entre ces deux méthodes nous semble cependant bon. Les différences sont en moyenne inférieures à 10 mm pour les sous-parcelles les moins drainantes (2, 4, 5 et 6) ; elles sont de l'ordre de 20 mm pour les sous-parcelles 1 et 3 (les plus drainantes). On observe cependant des écarts qui peuvent aller du simple au triple pendant certaines périodes (cas de la sous-parcelle 3 pour la période du 1/8 au 3/9).

IV - DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude de la variabilité spatiale des principaux paramètres physiques et hydrodynamiques montre que ceux-ci suivent deux types de loi : les humidités volumiques et les gradients de charge sont normalement distribués tandis que le taux d'éléments inférieurs à 20 μ m et la vitesse d'infiltration permanente ont une distribution lognormale. Ceci implique donc un calcul différent de leurs valeurs moyennes pour en avoir une estimation correcte.

L'évapotranspiration présente une faible variation spatiale ; son coefficient de variation est de 7 % pour l'arachide et de 11 % pour le mil. Les besoins hydriques des variétés d'arachide et de mil cultivées étant de l'ordre de 450 mm, il apparaît, par rapport aux besoins hydriques, de 80 mm pour l'arachide, 120 mm pour le mil en 1980 et de 88 mm pour le mil en 1981. La faiblesse des rendements obtenus serait à lier à ce déficit.

Le drainage à l'échelle de la parcelle est très variable et sa liaison significative avec le taux d'argile + limon semble indiquer que cette variabilité est le reflet de celle de ce paramètre textural. Les résultats obtenus sous mil suggéreraient que la distribution pluviométrique a plus d'influence que la quantité d'eau totale tombée sur les flux hydriques en profondeur.

Les pertes par lixiviation à l'échelle de la parcelle sont également très variables. Si on peut admettre que durant notre étude, où les bougies fonctionnaient en plein champ et dans des conditions non homogènes, le colmatage des pores des bougies puisse avoir lieu, bien que le sol étudié soit très sableux, l'inexistence de corrélations significatives simples ou curvilinéaires entre les volumes d'eau recueillis et les concentrations de la solution du sol nous porte à croire que ce phénomène n'a pas, du moins significativement, influencé les résultats obtenus. La variabilité observée résulterait, comme pour le drainage, de celle du taux d'éléments fins aux côtes de référence.

Il apparaît ainsi comme pour la conductivité hydraulique (VAUCLIN et al. (13)) que le taux d'argile + limon est un paramètre explicatif très significatif du drainage et des pertes minérales par lixiviation sous culture dans les sols Dior. Avec des taux inférieurs à 5 % à 110 cm et à 8 % à 180 cm les flux de drainage et les pertes par lixiviation peuvent respectivement atteindre 50 mm sous mil et arachide, 20 à 50 kg/ha d'azote-nitrate, 30 à 40 kg/ha de CaO, 10 à 25 kg/ha de MgO, 2 à 3 kg/ha de K₂O sous arachide et 20 kg/ha d'azote-nitrate, 30 kg/ha de CaO, 15 kg/ha de MgO et 3 kg/ha de K₂O sous culture de mil. Pour des taux d'argile + limon supérieurs à 10 % à 110 et à 180 cm de profondeur, les flux hydriques et minéraux sous culture d'arachide et de mil sont très faibles voire nuls.

CHARREAU et CHAUVEL (3) ont trouvé sur dix ans de mesures des pertes minérales par lixiviation sur sol Dior obtenues à l'aide de cases lysimétriques qui s'élèvent 3 à 5-15 kg/ha/an d'azote-nitrate, 40 kg/ha/an de CaO, 10-25 kg/ha de MgO et 10 kg/ha de K₂O.

De ces résultats qui n'ont pas été analysés sous l'angle de la discrimination qu'opère le taux d'éléments inférieurs à $20\mu\text{m}$, on peut seulement conclure qu'il y a un bon accord entre les deux méthodes d'estimation des pertes minérales par lixiviation pour des taux d'argile + limon aux côtes de référence inférieurs ou égaux à 5 - 8 %.

Les faibles pertes potassiques, dans ce sol très sableux, pauvre en matière organique et dont la fraction argileuse est essentiellement composée de kaolinite (90 % environ), sont a priori inattendues. Il ne nous est pas possible avec les résultats que nous avons obtenus d'en formuler une explication satisfaisante. C. PIERI (12) a montré que sous culture de mil le potassium est rapidement absorbé en début de cycle. Ceci serait une indication d'un éventuel effet de la plante sur la non lixiviation du potassium. Mais le sol lui-même pourrait jouer un rôle non négligeable dans ce phénomène qui nécessite d'être approfondi.

Pour éviter d'avoir à prendre en compte les prélèvements racinaires pour le calcul des flux aux côtes de référence, il faudra choisir celles-ci plus en profondeur. S'il n'est pas aisé de fixer ces côtes du fait que la dynamique et l'activité racinaires sont influencées par la répartition pluviométrique et le profil d'humidité du sol ; on peut penser, sur la base des observations faites sur le système racinaire en 1981 et des travaux de CHOPART (8), Les réduire très significativement en se plaçant à 150 cm sous arachide et 200 cm sous mil.

Le bilan minéral calculé est négatif pour tous les éléments sauf pour le phosphore. Les différences spatiales du bilan d'un élément dépendent de l'importance du terme pertes par lixiviation par rapport à celui des exportations par Les cultures qui sont très peu variables à l'échelle de La parcelle. Pour l'azote et le calcium le déficit de leur bilan est respectivement 6 fois et 4 fois plus élevé dans des conditions de lixiviation importante (taux d'argile + Limon égal à 5 - 8 % en profondeur) que quand Le sol présente de très faibles pertes par lixiviation. Le phosphore, le potassium et le magnésium dont Les pertes par lixiviation sont nulles (cas de P), très faibles (cas de K) et peu importantes par rapport aux exportations par les récoltes (cas de Mg) ont des bilans à l'échelle de la parcelle très peu variables.

Dans les sols Dior si Le taux d'éléments fins en profondeur est élevé (plus de 10 % au-delà de 110 cm) les résultats obtenus montrent que l'on peut envisager d'obtenir un bilan azoté équilibré, celui-ci pourrait être obtenu en renforçant la fertilisation azotée du mil qui suit L'arachide.- Par contre, si la teneur en éléments fins en profondeur est inférieure à 8 % à partir de 110 cm, il apparaît très difficile d'équilibrer Le bilan de l'azote qui présente un déficit de près de 70 kg/ha pour Les trois années.

Le bilan positif du phosphore, + 30 kg/ha de P_2O_5 , ne signifie pas nécessairement une amélioration possible de L'alimentation phosphatée des plantes dans les systèmes de culture semi-intensifs, arachide ~ mil, rien ne permet en effet de dire que cette quantité de phosphore se trouve sous forme assimilable.

Le déficit du bilan potassique (46 kg/ha) résulte essentiellement des exportations par les récoltes. Les travaux de PIERI (12) sur la fertilisation potassique ont montré que plus on exporte de la potasse, plus le mil en exporte. Il est donc peu probable que l'on puisse arriver à équilibrer le bilan de K dans ces systèmes de culture d'autant plus que la restitution au sol des pailles de mil (les fanes d'arachide étant destinées à l'alimentation animale), qui contiennent l'essentiel de la potasse exportée par cette plante, se heurte à des contraintes techniques (inexistence ou insuffisance d'une force de traction, prise en masse très rapide du sol après 1 saison des pluies qui rend le travail du sol très difficile) qui la rendent inap-licable en milieu paysan.

Le bilan du calcium et du magnésium est très déficitaire, de 130 à 200 kg/ha de $\text{Ca O} + \text{Mg O}$. Pour le calcium, la composante perte par lixiviation est très importante si le profil du sol présente à partir de 110 cm une faible teneur en éléments fins, tandis que pour le magnésium ce sont les exportations par les récoltes et principalement le mil qui en sont la cause essentielle. Cet important déficit en $\text{Ca O} + \text{Mg O}$ est un facteur important de dégradation de la fertilité du sol (acidification, mauvaise alimentation calcique et magnésienne des plantes). Les plantes pouvant consommer des quantités de Ca O et de Mg O (tableau X) aussi, sinon plus importantes que le phosphore ; les sols Dior étant riches en calcium et magnésium échangeables et totaux, par ailleurs très peu pourvus en ces éléments, une attention plus grande que celle que l'on en a actuellement doit être accordée à ces deux éléments.

En conclusion, on soulignera que les sols Dior qui ont souvent été dits homogènes présentent, en réalité, une très grande variabilité spatiale des principaux paramètres qui régissent les transferts hydriques et minéraux à travers leur profil. Le taux d'argile + limon est un facteur explicatif très significatif de leur comportement hydrique et minéral. Une limitation de la production de ces sols par une alimentation calcique et magnésienne insuffisante est fort probable à moyen ou long terme dans des conditions de cultures sans apport au moins des quantités de Ca et de Mg égales à celles exportées par les plantes.

REFERENCES

1. C. DANCETTE (1973)
Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal
Isotopes and radiation techniques in Soil physics and irrigation studies
AIEA SM 1976/36 VIENNE
2. C. DANCETTE (1973)
Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal
Agron. Trop. Vol. XXXI, n° 4, pp. 321-338
3. C. CHARREAU et A. CHAUVEL (1969)
Compte rendu d'expérimentation sur les cases lysimétriques
Doc. ronéo IRAT/Sénégal
4. C. PIERI (1979)
Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal à l'aide de capteurs en céramique poreuse
Agron. Trop. Vol. XXXIV, n° 1, pp. 9-22
5. A.W. WARICK and D.R. NIELSEN (1980)
Spatial variability of soil physical properties in the field
in : Applications of soil physics - Ed. D. HILLEL,
Academic Press - NEW YORK, pp. 319-344
6. A.J. DECK, R.J. LUXMOORE and J.L. STOLZY (1977)
Effects of spatial variability of soil hydraulic properties in water budget modeling
Water Resources Research 13 (2) : pp. 348-354
7. J. IMBERNON (1982)
Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal
Application au calcul du bilan sous culture
Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle
8. J.L. CHOPART (1980)
Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide - mil - sorgho - riz pluvial)
Thèse de doctorat d'Université

9. F. TALSMA, F. M. HALLAM and R. S. MANJIL (1979)
Evaluation of porous cup soil - water extractors: Physical factors
Aust. J. Soil Res. n° 17, pp. 417-422
10. M.J. LEVIN and D.R. JACKSON (1977)
A comparison of in situ extractors for sampling soil water
Soil Sci. Soc. AM. J. Vol. 41, pp. 535-536
11. E.A. HANSEN and A.R. HARRIS (1975)
Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. vol. 39, pp. 528-536
12. C. PIERI (1979)
La fertilité potassique du mil pennisetum et ses effets sur la fertilité
d'un sol sableux du Sénégal.
Compte rendu de cinq, années d'expérimentation
Document IRAT-ISRA non publié. Version abrégée publiée in Revue de la
Potasse, Section 27, n° 4, 1-12 (1982)
13. M. VAUCLIN, J. IMBERNON, G. VACHAUD
Analyse comparative de différentes méthodes de détermination de la conduc-
tivité hydraulique des sols non saturés de la zone Centre - Nord du Sénégal
Agron. Trop., n° 38, 3

ANNEXES

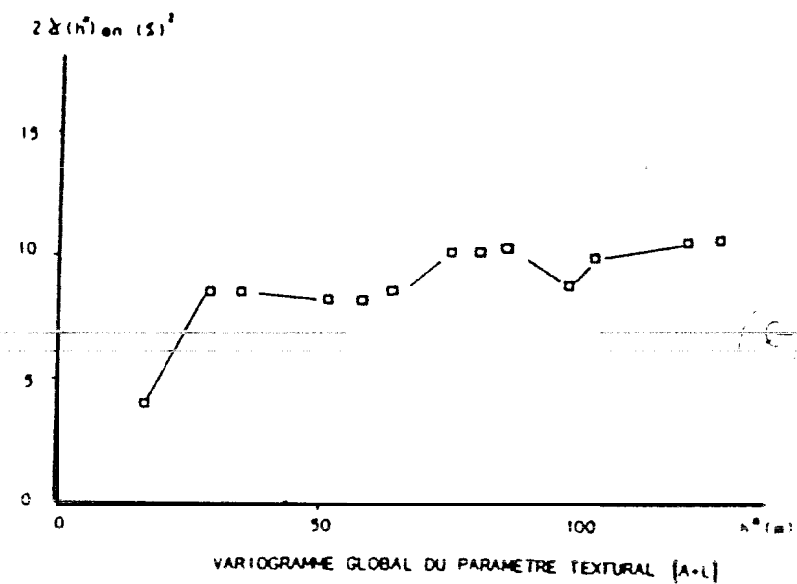
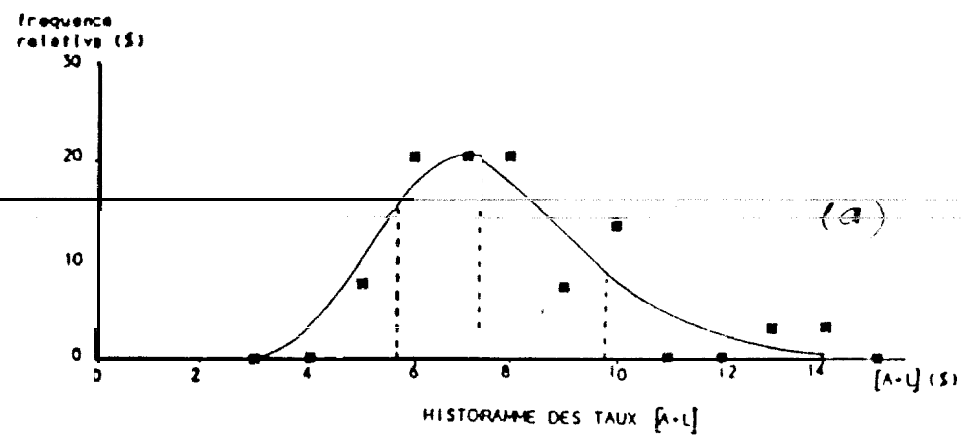
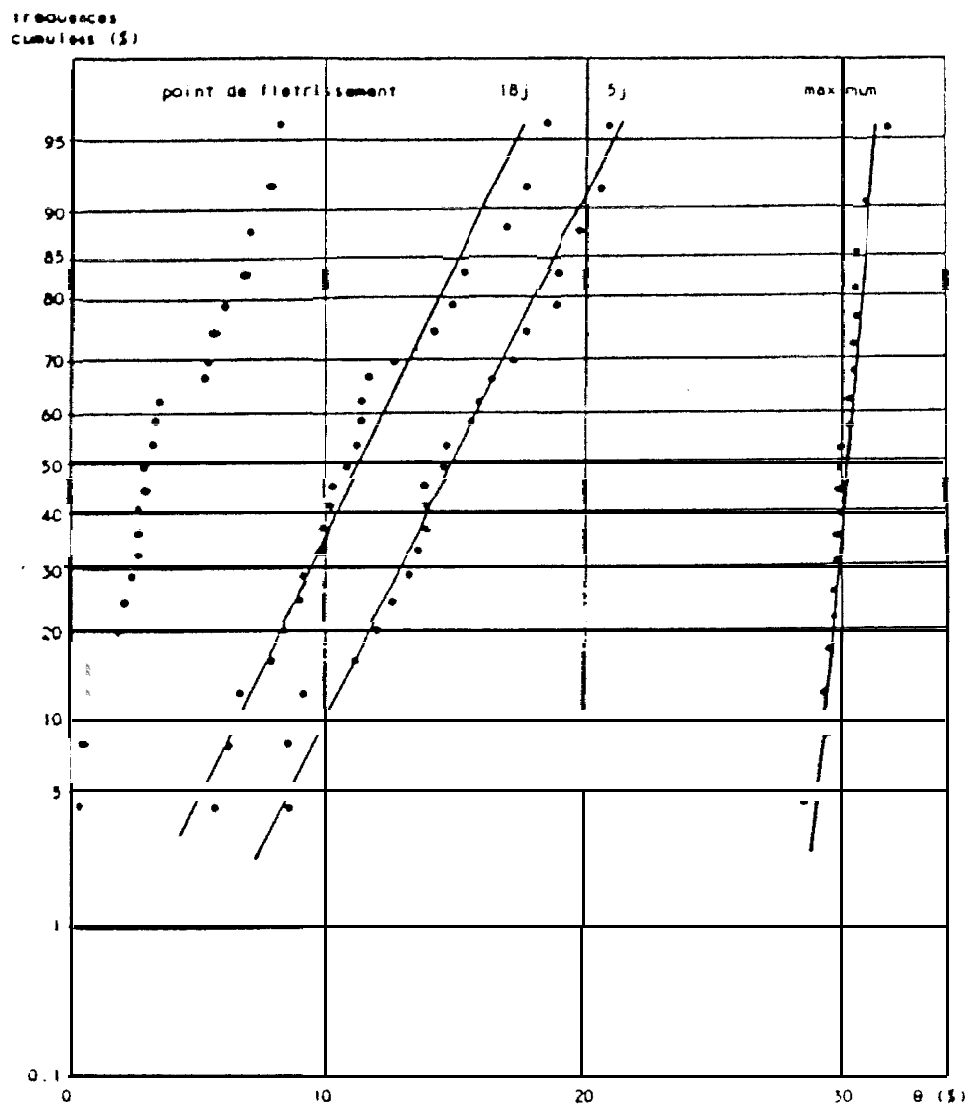
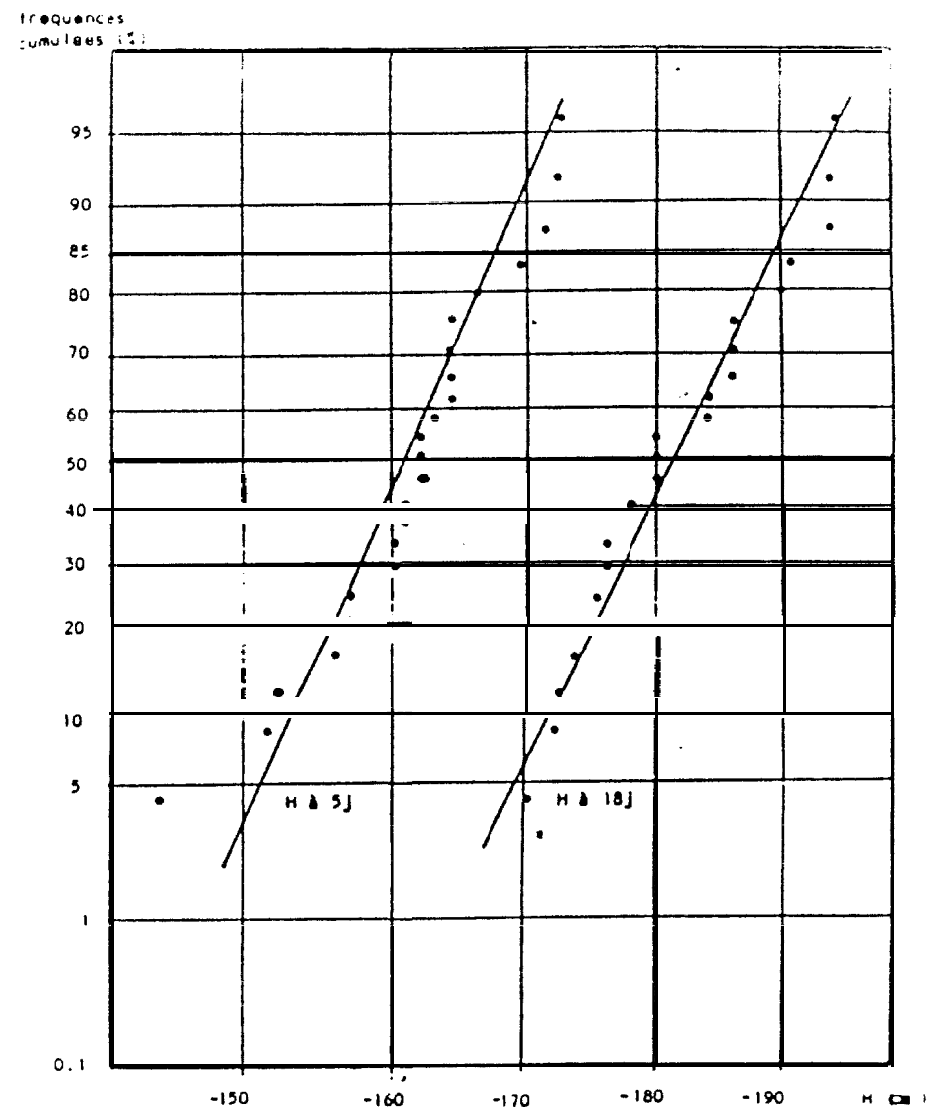


Figure 1 Histogramme (a) et variogramme (b) du paramètre textural (argile + limon)



(a) DISTRIBUTION DE FRÉQUENCES DES HUMIDITÉS EN RÉGIME PERMANENT D'INFILTRATION θ_0 , APRES 5 JOURS ET 18 JOURS DE RESSUYAGE ET AU POINT DE FLÉTRISSEMENT.



(b) DISTRIBUTION DE FRÉQUENCES DES CHARGES HYDRAULIQUES APRES 5 JOURS ET 18 JOURS DE REDISTRIBUTION (ECHELLE GAUSSO-LOGARITHMIQUE)

Figure 2 : Distribution de fréquences des humidités volumiques (a) et des charges hydrauliques (b)

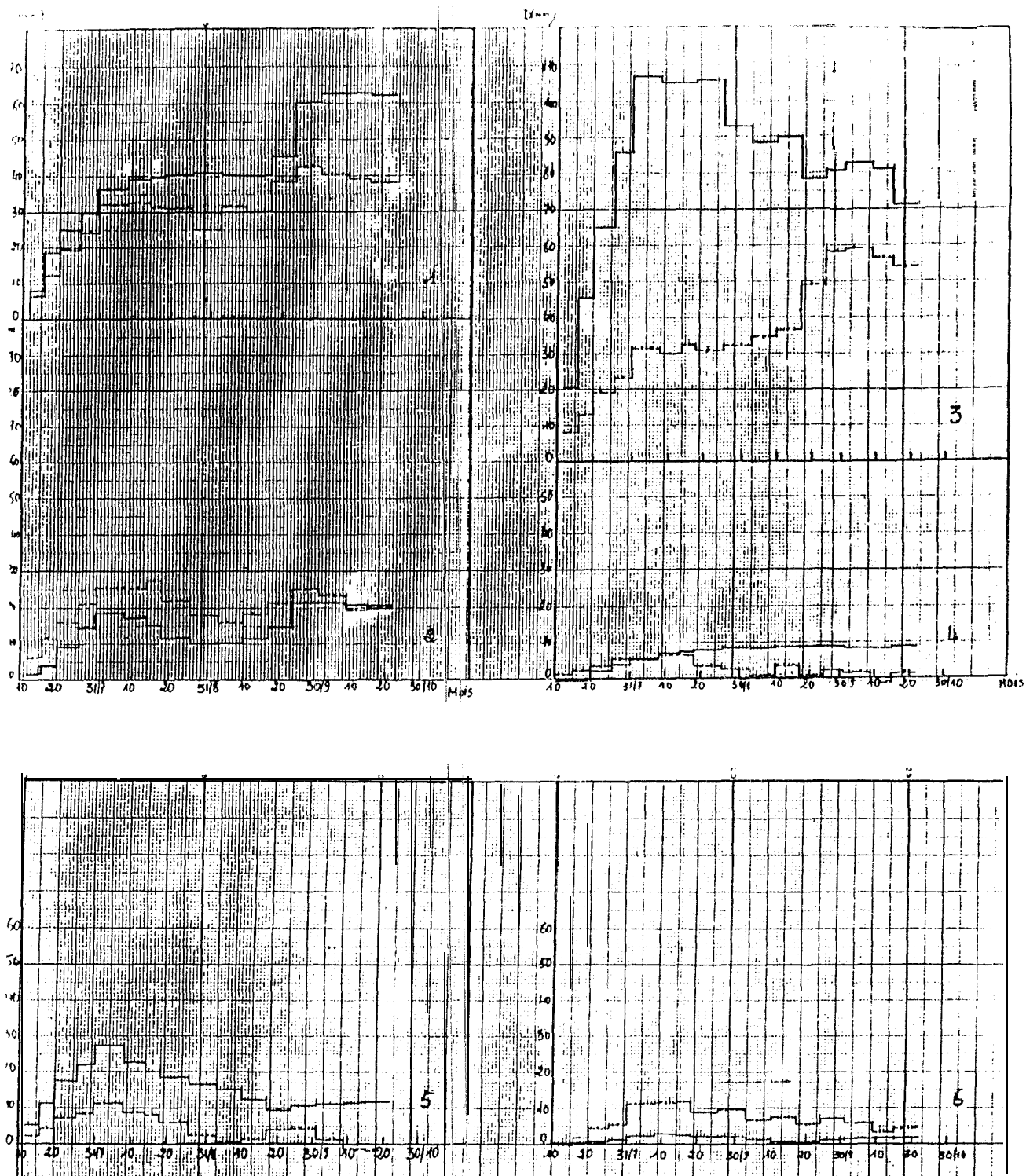


Figure 3 : Lames d'eau drainées cumulées à $z = 110$ cm sous arachide
(sous-parcelles 1, 2, 3, 4, 5 et 6)

— : DARCY

-.-. : Variation de stock