

# LA VARIABILITÉ DE L'HUMIDITÉ DU SOL EN MILIEU SAHÉLO-SOUDANIEN ET SON CONTRÔLE À L'ÉCHELLE MICRO-MÉTÉOROLOGIQUE : (300 M x 300 M)

A.M. SICOT<sup>1</sup>, LAOUALI DUNGAL<sup>2</sup>, P. MARINI<sup>3</sup>

---

## INTRODUCTION

Milieu réactionnel ou facteur actif, l'eau du sol intervient en de nombreux processus biophysiques à l'interface sol-végétation-atmosphère. Il s'ensuit que le taux d'humidité du sol constitue une donnée essentielle pour un grand nombre de disciplines. Face à cette demande s'étalant du centimètre aux milliers de kilomètres, de l'observation instantanée à plusieurs cycles hydrologiques annuels, la détermination de l'humidité du sol est une donnée relativement ponctuelle et variable dans l'espace et dans le temps. Il est par suite, souvent impératif de répéter les mesures pour les rendre représentatives, comme il est souvent nécessaire de positionner une ou plusieurs valeurs mesurées dans la gamme de dispersion locale d'une grandeur étudiée.

Ce problème d'intégration et d'identification des mesures d'humidité du sol est fondamental dans l'expérience Hapex-Sahel et le passage de la placette de mesure au WAB (wind affected blob), autrement dit à la parcelle de 300 m sur 300 m, est le premier maillon de la quête de représentativité pour les données et les transferts d'échelles.

Dans cet article, nous examinerons successivement :

- l'étendue de la dispersion de l'eau du sol et son déterminisme dans deux sites du dispositif expérimental d'Hapex-Sahel ;
- la stratégie utilisée pour l'échantillonnage et le contrôle de la dispersion des données à l'échelle micrométéorologique susmentionnée.

---

<sup>1</sup>LCSC, Centre Orstom, 911 av. Agropolis, B.P. 5045 - 34032 Montpellier, France.

<sup>2</sup>Faculté des sciences Université de Niamey, Niger.

<sup>3</sup>IRI B.P. 10727 Niamey Niger.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude a été conduite dans le contexte du programme Hapex-Sahel. Au cours de cette expérience pluridisciplinaire internationale, des données diverses ont été collectées en vue de paramétrer des modèles de circulation atmosphérique destinés à approfondir les connaissances dans le domaine du climat et des changements climatiques : HOEPFFNER *et al.* (1991).

Le suivi de l'eau du sol, principal objet des investigations, s'est effectué en milieu semi-aride, en deux sites d'un petit bassin versant de 15 km<sup>2</sup> étudié par le laboratoire d'hydrologie de l'Orstom au Niger : ESTÈVES *et al.* (1993). L'un d'eux, situé à mi-pente, est une jachère à *Guiera senegalensis* de 9 ans. L'autre, en bas de pente, jouxtant un petit marigot, est en culture traditionnelle de mil depuis 5 ans.

Les données climatiques ci-dessus, relevées en 1992 dans les stations micrométéorologiques de l'expérience, par Monteny, définissent un climat hypersec et chaud. La pluviosité est unimodale. Étendue sur une période de trois à quatre mois axée sur le mois d'août, elle est très erratique, en début et fin de saison pluvieuse, tout particulièrement.

Les sols, tous deux ferrugineux tropicaux, se sont édifiés sur sable dunaire. Ils sont dans l'ensemble, peu lessivés, peu différenciés jusqu'à 2 m-2,50 m de profondeur. Au-delà, il y a induration et formation d'une carapace d'environ 50 cm d'épaisseur. Y fait suite, une couche de sable fin de couleur olivâtre de transition avec la roche-mère.

**Tableau 1**

Données climatiques enregistrées à la station centrale en 1992

Mois	Pluie	HRmin	HRmax	Tamin	Tamax	Vmin	Vmax	ETP
Janv.		0,12	0,36	15,5	29,9	0,6	4,4	5,7
Févr.		0,08	0,21	17,6	34,2	0,6	4,7	6,5
Mars		0,08	0,21	17,6	34,2	0,6	4,7	6,5
Avril		0,19	0,31	25,2	41,2	0,5	4,5	7,1
Mai	3,5	0,27	0,65	27,6	39,6	0,9	4,9	7,6
Juin	39	0,33	0,8	25,7	38,2	0,7	3,4	5,7
Juil.	109	0,47	0,9	23,9	34,2	0,8	5,8	5,7
Août	207	0,57	0,95	22,8	32,1	0,2	5,2	6,7
Sept.	65,5	0,51	0,95	21,8	33,9	0,2	4	7,5
Oct.		0,21	0,81			0,3	3,8	
Nov.		0,1	0,55			0,4	3,6	
Déc.								

Pluie : pluviométrie mensuelle ; HRmin et HRmax, Tamin et Tamax : humidité relative et température minimale et maximale de l'air ; Vmin et Vmax : vitesse minimale et maximale du vent.

La végétation naturelle est une steppe arbustive dominée en strate ligneuse par des *Combretum* et des épineux du genre *Acacia*. L'abondance de *Zornia glochidiata* qui se substitue par endroits aux graminées annuelles de la strate herbacée, est indice de surpâturage.

Les profils hydriques nécessaires à l'analyse de la dispersion de l'eau du sol ont été relevés par carottage au moyen d'une tarière agronomique de 4 cm de diamètre. Le dispositif de prélèvement des échantillons et la stratégie adoptée pour le contrôle de l'humidité du sol fait précisément l'objet de cet article et seront explicités ci-après. Le taux d'humidité des échantillons de sol a été déterminé par gravimétrie durant l'échantillonnage et par neutronométrie pour le suivi. Nous examinerons par endroits le taux d'humidité du sol, mais il sera surtout question dans ce document, de la quantité d'eau du premier mètre du profil.

Les résultats ont été analysés à l'aide de méthodes de statistique courante et de géostatistique.

## RÉSULTATS

### L'ÉTAT HYDRIQUE DU SOL

La figure 1 rassemble des profils hydriques prélevés en deux sites, dans chacune des deux stations étudiées. Il s'agit de relevés exécutés le 19 août (232 jc), le 19 septembre (260 jc) et le 9 octobre (283 jc) en 1992. Ces dates concernent respectivement : le début d'humectation, la pleine humectation et le début de dessèchement du sol.

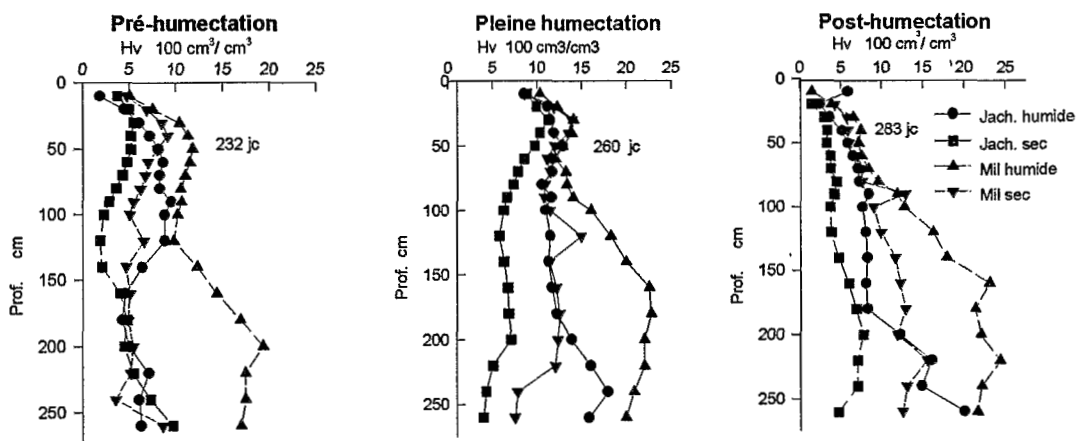


Figure 1 :

Disparités hydriques sous jachère et sous mil, aux 232, 260 et 283<sup>e</sup> jours calendaires.

On constate, qu'indépendamment de leur localisation, les trois séries de profils se regroupent à chaque date, en *sites secs* de faibles taux d'humidité et en *sites humides* de taux d'humidité plus élevés. Cette partition se maintient aux trois dates. Il s'ensuit, que dans cette figure sont mises en évidence la grande dispersion spatiale de l'eau du sol et la permanence spatio-temporelle de celle-ci.

Incidentement, un schéma de configuration spatio-temporelle de l'eau du sol en mosaïques de sites ou faciès secs et humides, est suggéré. Le sol semble être en permanence une mosaïque de sites : secs, humides et intermédiaires.

Cette configuration hydrique déjà observée dans les sols des environs de la Mare d'Oursi au Burkina Faso : SICOR (1983), pourrait caractériser les milieux sableux et sablo-argileux en régions semi-arides.

On peut en outre souligner, les taux d'humidité systématiquement plus élevés sous mil que sous jachère. Cette remarque indique l'existence de disparités intersites et peut laisser supposer une hétérogénéité à échelles imbriquées.

Notons en terminant, que l'hétérogénéité hydrique en profondeur est tout aussi importante sinon plus, qu'en surface.

## ANALYSE DE LA DISPERSION DE L'EAU DU SOL

Après ce constat, la dispersion hydrique dans chaque station, a été analysée au moyen d'une grille d'échantillonnage d'environ 300 m x 300 m, à maille carrée, de 50 m de côté. L'opération s'est déroulée sur trois phases du cycle hydrologique annuel : en pré-humectation, pleine humectation et début de dessèchement ou post-humectation. Les profils hydriques nécessaires à l'analyse ont été relevés aux noeuds de la grille, par carottage de 10 en 10 cm, sur 1 m de profondeur. Il est à noter que les impératifs de faisabilité de l'échantillonnage et de démarrage de l'expérience n'ont pas permis de rechercher l'exhaustivité en cette étude. En particulier, le choix de 50 m pour la distance entre les profils et de 1 m pour la profondeur de sondage s'est imposé, afin de constituer des échantillons de données indépendantes appréhendant quasi instantanément l'aire du site dans son ensemble. L'analyse a par suite visé à contrôler les éventuelles relations de dépendance intersites de l'humidité du sol, à partir de 50 m.

Les éléments des figures 2 représentent schématiquement l'état hydrique du sol sous la jachère aux trois époques susmentionnées. Les profils hydriques sont illustrés aux noeuds de la grille d'échantillonnage, par des icônes arborescentes dont les branches sont proportionnelles aux taux d'humidité aux profondeurs correspondantes. Cette représentation est due à J. Thierry (1992), modélisateur du CEA. La juxtaposition hétérogène de sites d'humidité disparate, suggérée ci-dessus par la représentation des mesures couplées, se confirme dans les grilles et l'on voit que la mosaïque hydrique est indépendante du fonctionnement de l'écosystème : humectation, dessèchement, ...

Pour ce qui est des corrélations hydriques intrasites, soit des liaisons de l'eau du sol entre les placettes de relevés, on doit noter en préliminaire que les variogrammes sont hétérogènes, l'hétérogénéité affectant à la fois les points d'une même direction comme ceux de directions différentes (anisotropie).

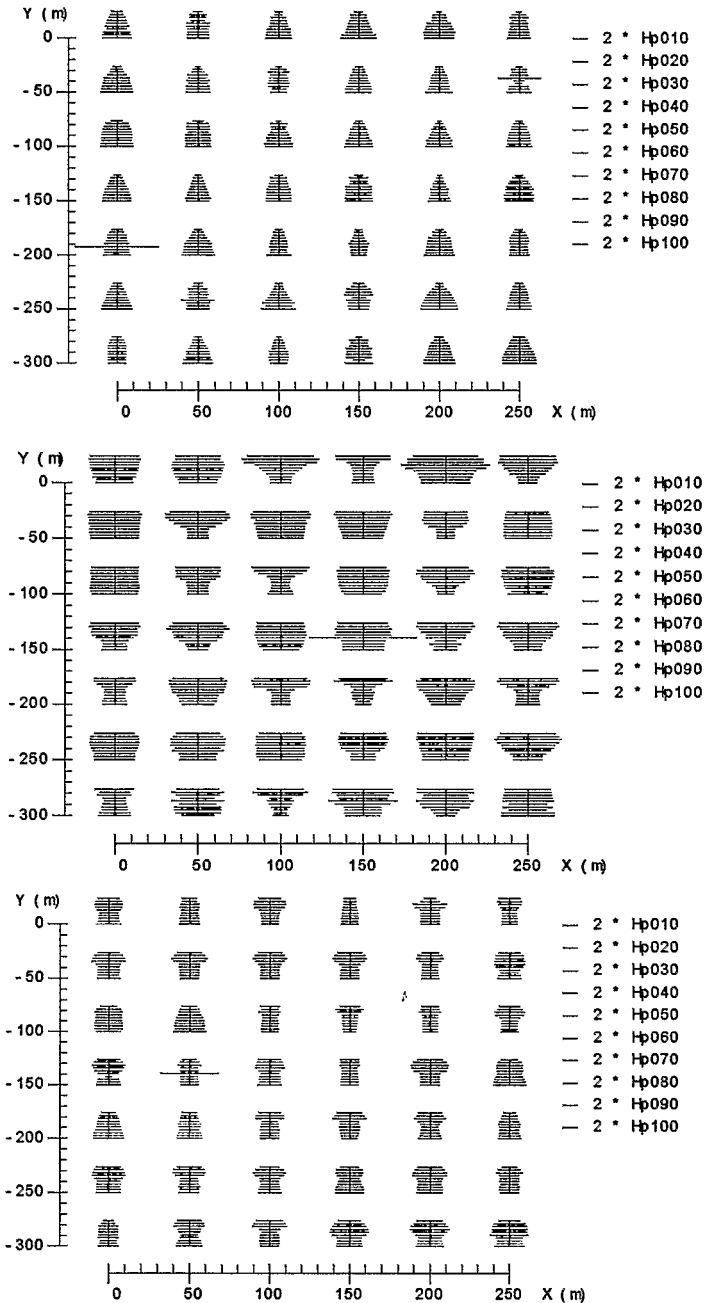


Figure 2 :

Distribution de l'humidité du sol de 10 en 10 cm sur 1 m sous jachère, dans la grille d'échantillonnage, respectivement en pré, pleine et post-humectation.

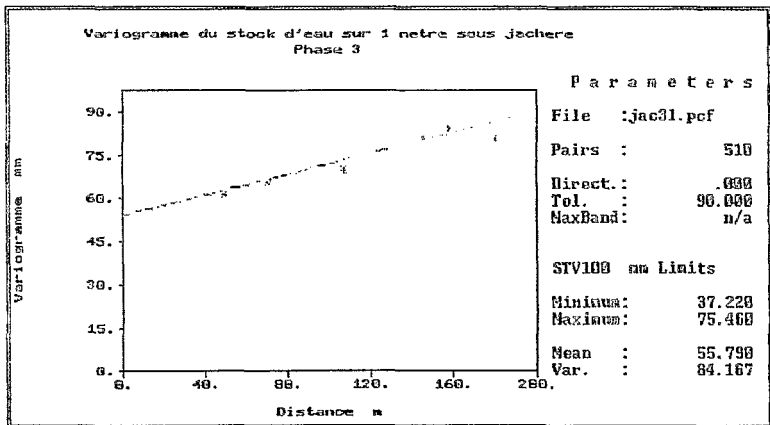
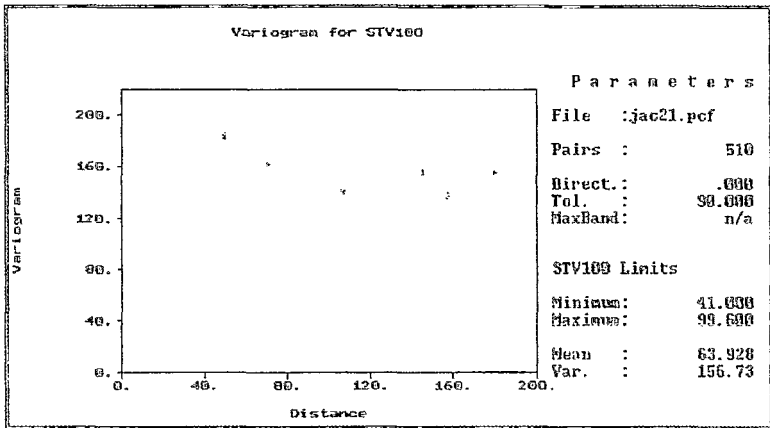
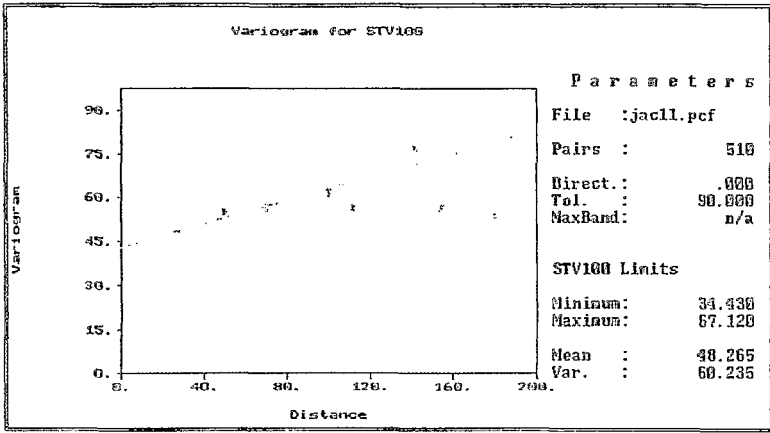
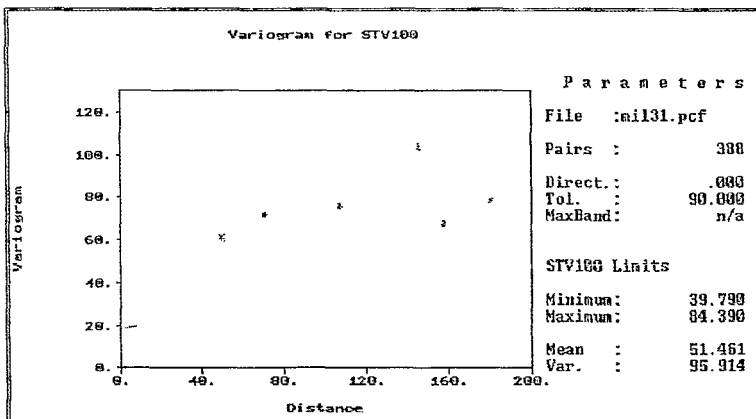
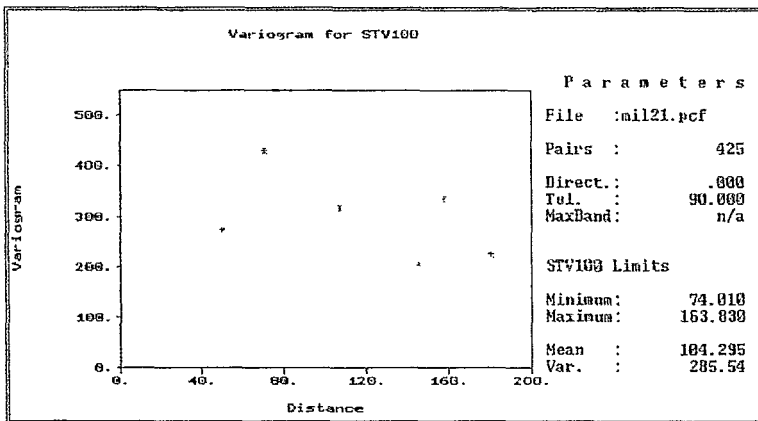
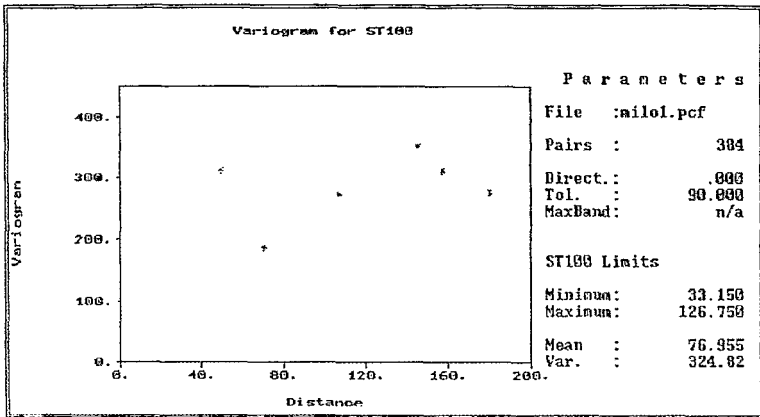


Figure 2a :

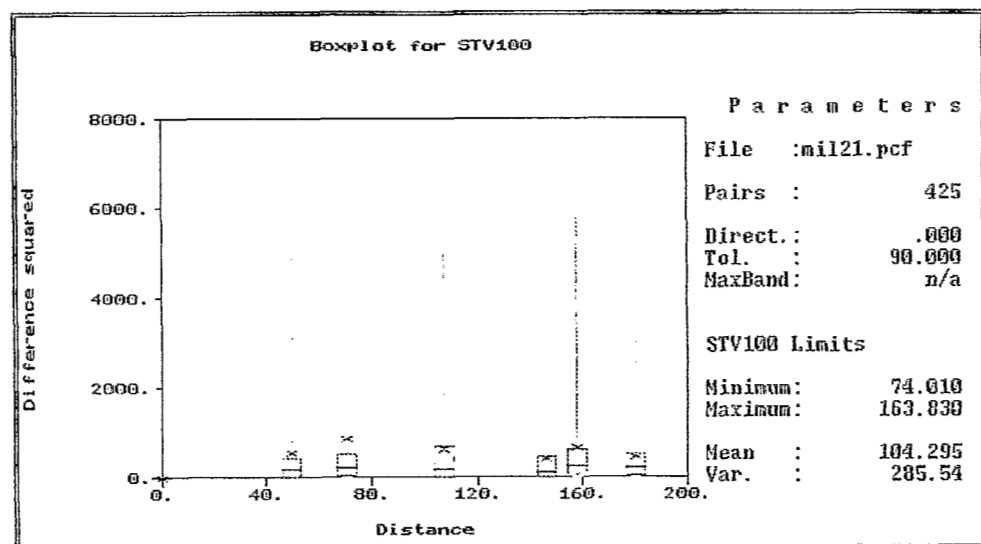
Variogramme du stock d'eau sur 1 m sous jachère: en pré, pleine et post-humectation.



**Figure 2b :**

*Variogramme du stock d'eau sur 1 m sous mil : en pré, pleine et post-humectation.*

Dans la plupart des figures en effet, la suite des points alternativement croissante et décroissante, pourrait définir une fonction périodique traduisant une certaine périodicité ou pseudo-périodicité dans la répartition spatiale de l'eau du sol (cf. variogrammes du mil). Cependant, ces points sont entachés d'une grande imprécision à l'exemple des points calculés ci-dessous pour le variogramme du mil en phase 2 (figure 3).



**Figure 3 :**

*Intervalle de confiance des points du variogramme sous mil en phase 2.*

Il s'ensuit que les fluctuations sont peu significatives et que l'enveloppe des points expérimentaux semble plus apte à représenter cette configuration désordonnée, en mosaïque, de sites disparates.

Sur cette base et en pré-humectation, le variogramme de la quantité d'eau stockée sur 1 mètre de sol sous jachère, peut être considéré :

- soit uniforme et constant ;
- soit composite : croissant et quasi linéaire sur environ 150 m, constant au-delà.

En deçà de 50 m, une pépite de 30 à 50 mm donne la mesure de l'hétérogénéité hydrique relativement importante sur cette distance. On ne peut préjuger des relations hydriques sous-jacentes faute de mesure.

S'agissant de la culture de mil, les valeurs sont nettement plus élevées et le variogramme plus hétérogène. En ce site se justifient les remarques faites en préliminaire quant à l'interprétation du variogramme. Il apparaît pseudo-périodique et le pas de scrutation est inadapté à l'analyse.



En pleine humectation, nous avons un variogramme inversé (décroissant puis croissant) des plus curieux et inattendus et cela dans les deux stations. Cette figure doit être analysée en se référant à la fois aux fluctuations hydriques susmentionnées, à la longueur de 50 m du pas de sondage et à l'absence de mesure en deçà de 50 m. En ces conditions, il est fort possible que l'hétérogénéité sur 0-50 m soit croissante dans cet intervalle, passant du niveau de la pré-humectation à celle de l'humectation, sans que le fait puisse être enregistré. Cette remarque est confortée par le variogramme sous mil effectivement croissant avant la valeur maximale enregistrée. C'est aussi dans ces figures que l'hypothèse d'une formulation trigonométrique du variogramme et par suite d'une périodicité dans la structuration spatiale de l'eau du sol paraît la plus pertinente.

En début de dessèchement, le variogramme peut être considéré comme linéaire dans les deux sites. Une chute des valeurs à partir de 150 m est à noter sous mil.

Sur le plan de la statistique courante, le tableau ci-après donne les éléments de la distribution, dans les deux sites et aux différentes phases de l'étude.

**Tableau 2**  
Paramètres statistiques de la distribution du stock d'eau sur 1 mètre aux différentes phases d'échantillonnage

Station	Jachère			Mil		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Min.	34,4	41	37,2	33,2	74	39,8
25%	42,5	54,7	48,8	63	92,9	44
50%	47,5	66,7	57	75,7	103,9	49,8
75%	53,7	71,1	75,5	93,9	111,9	54,9
Max.	67,1	99,6	75,5	126,8	163,8	84,4
Moy.	48,3	63,9	55,8	77,4	104,3	51,5
Écart-type	7,8	12,5	9,2	18,5	16,9	9,8
CV %	16,1	19,6	16,4	23,9	16,2	19
C. assym.	0,4	0	0	0,1	1,1	1,5
C. aplat	2,9	3,2	2,6	3,4	5,7	5,4

La fonction de distribution est constamment normale sous jachère. Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont respectivement nuls et proches de 3. Sous culture de mil, cette fonction est aussi normale pendant la première phase, soit en début d'humectation. Elle est composite aux deux autres périodes : les deux coefficients précités diffèrent respectivement de 0 et de 3, et il est par ailleurs possible d'individualiser deux ou trois sous-populations dans les courbes des probabilités cumulées (figure 4).

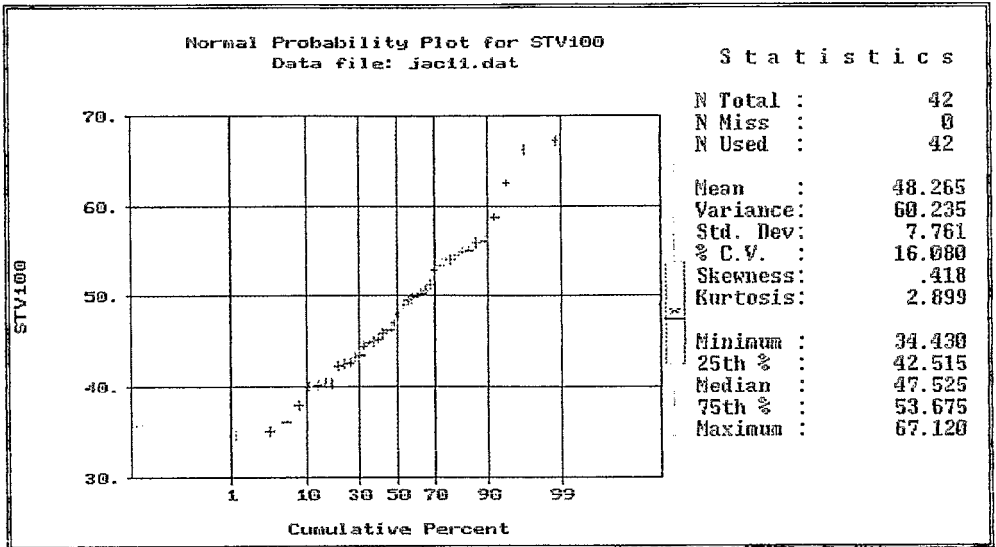


Figure 4a :

Distribution fréquentielle du stock d'eau sur le premier mètre de sol, sous jachère.

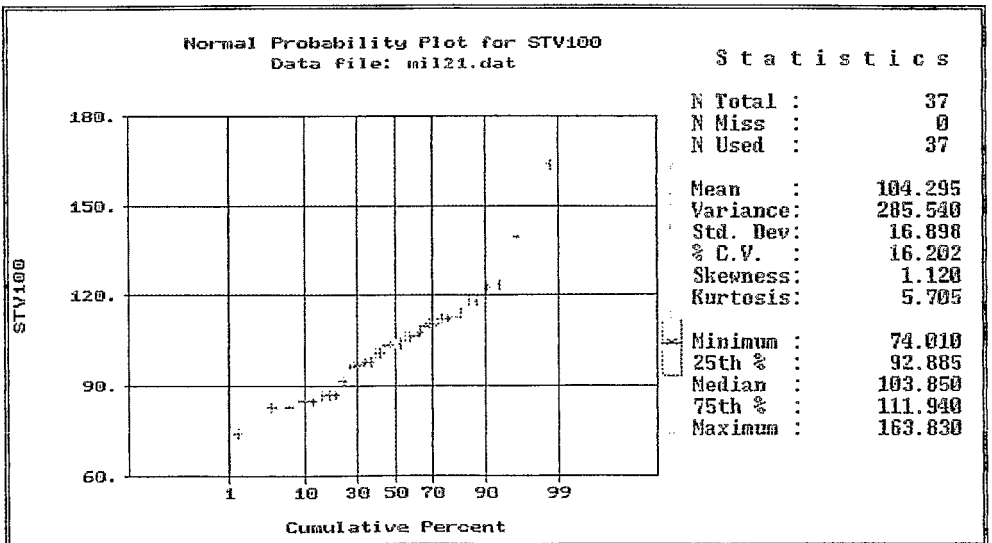


Figure 4b :

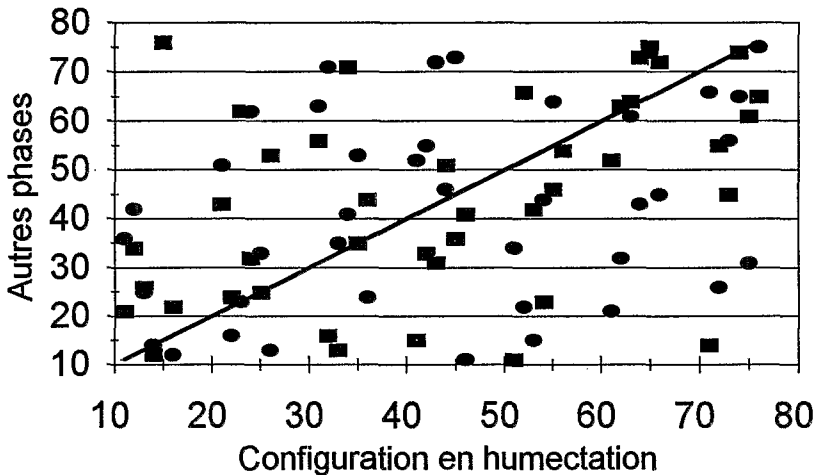
Distribution fréquentielle du stock d'eau sur le premier mètre de sol, sous mil.

Néanmoins, ces distributions sont toutes globalement assimilables à des lois normales.

Sous jachère, le coefficient de variation d'environ 16 % augmente avec l'humectation, passant par un maximum voisin de 20 %. En culture de mil, ce coefficient plus élevé, décroît au contraire de 24 à 16 %, avec l'humidification du profil. Ces valeurs sont moyennes d'après GASCUEL-ODOUX (1984) pour qui le coefficient de variation du taux d'humidité du sol se situe entre 10 et 50 %.

À la figure 5 sont comparées les distributions hydriques du sol en pré et en post-humectation (axe des ordonnées du graphique titré *autres phases*), à celle de la pleine humectation (axe des abscisses titré *configuration en humectation*). En ce type de graphique, une configuration hydrique stable est représentée par des points alignés sur la bissectrice du système d'axes. Dans le cas présent, une certaine instabilité est, au contraire, mise en évidence. En effet, seul un petit nombre de sites proches de la bissectrice du système d'axes marque l'existence d'un noyau de placettes plus ou moins stables, dans un contexte de fluctuations généralisées. L'instabilité de l'état hydrique du sol avait déjà été relevée en début d'humectation, sous culture de mil : GALLE *et al.* (1991).

### DISPERSION HYDRIQUE SOUS JACHERE COMPARAISON AUX DIFFERENTES PHASES



**Figure 5 :**

*Comparaison de la configuration spatiale de l'eau du sol en pré et post-humectation par rapport à la pleine humectation.*

## CONTRÔLE DE LA DISPERSION HYDRIQUE : COLLECTE DES DONNÉES REPRÉSENTATIVES POUR UN SUIVI DE L'HUMIDITÉ DU SOL

La collecte de données représentatives de l'humidité du sol doit satisfaire à deux impératifs :

- accéder aux données moyennes et cerner l'étendue de la dispersion hydrique ;
- maîtriser l'incidence de l'instabilité de la configuration hydrique du milieu.

Sur la base de la configuration hydrique du milieu en mosaïque de faciès d'humidité disparate, la première contrainte a été surmontée par la sélection de sites moyens et extrêmes.

À chacune des phases susmentionnées ont été échantillonnés :

- 1 à 2 sites moyens, à stock d'eau de valeur moyenne sur 1 m :  $\bar{X}$  ;
- 1 site sec représentant le stock hydrique moyen  $\bar{X}$ , moins 2 écarts-types (S), soit :  $\bar{X} - 2S$  ;
- 1 site humide, à stock moyen plus 2 écarts-types soit :  $\bar{X} + 2S$ .

Cet échantillonnage donne :

- une estimation des valeurs moyennes ;
- $n\bar{X} + (\bar{X} - 2S) + (\bar{X} + 2S) = (n+2)\bar{X}$  avec  $1 \leq n \leq 2$
- l'étendue de la variation de la variable :  $E = X_{max} - X_{min} = 4S$ ,
- l'écart-type de la mesure et de la moyenne, soit respectivement :

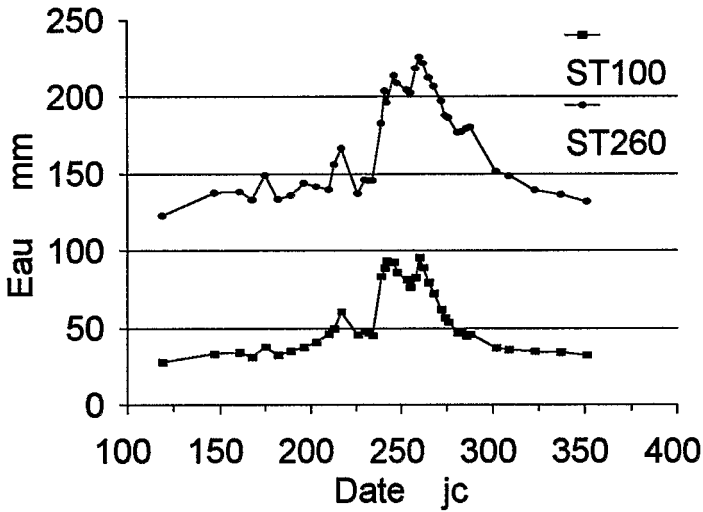
$$S = E/4 \text{ et } S_{\bar{x}} = E/4\sqrt{N} \text{ avec } N = 36 \text{ pour le mil ou } 42 \text{ pour la jachère.}$$

$$\text{L'indice de précision s'exprime par : } P = 2S_{\bar{x}} / \bar{X} = E / 2\bar{X}\sqrt{N}.$$

La seconde contrainte peut être maîtrisée en répétant autant que possible l'échantillonnage en des sites différents. Cette procédure tend à faire sonder toute l'aire d'étude et la zone échantillonnée à occuper tout l'espace disponible. L'étendue de variation appréhendée est augmentée pour cerner la valeur et la gamme de variation de l'humidité moyenne, malgré les fluctuations spatio-temporelles. Cette solution est approchée avec les répétitions de l'échantillonnage aux 3 phases hydriques susmentionnées qui sont considérées comme les plus influantes sur la configuration spatiale de l'eau du sol (cf. ci-après).

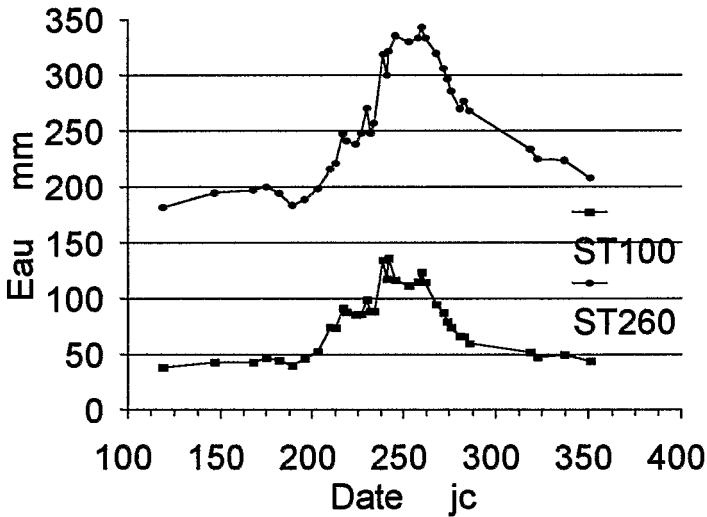
Cette méthodologie utilisée dans les WAB pendant l'expérience Hapex-Sahel, a permis le suivi de l'humidité du sol illustrée par l'évolution du stock d'eau sur 100 et 260 cm (figure 6).

### Stock hydrique sous jachere en 1992

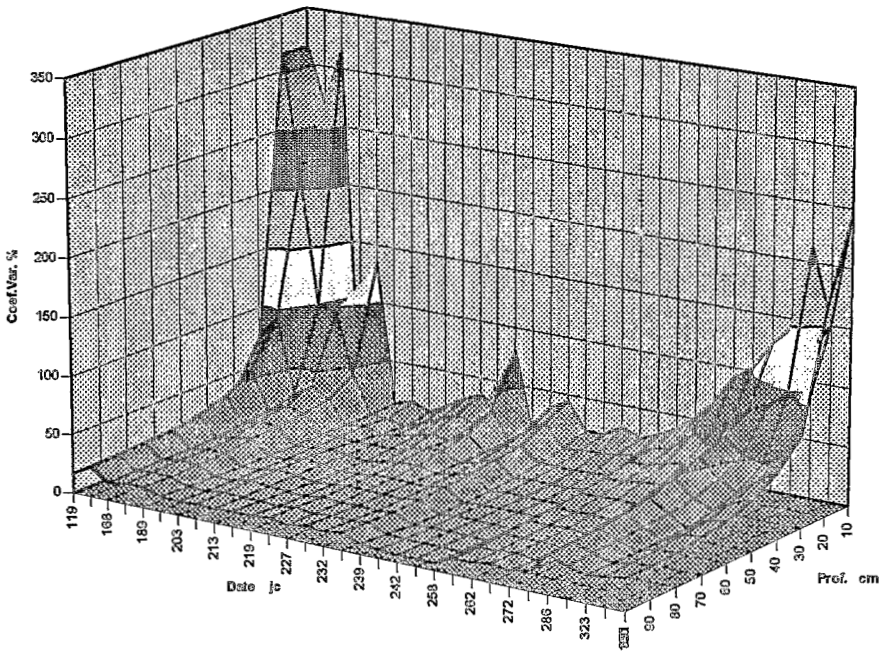


**Figure 6a :**  
*Évolution du stock d'eau sur 100 et 260 cm sous jachère.*

### Stock hydrique sous mil en 1992



**Figure 6b :**  
*Évolution du stock d'eau sur 100 et 260 cm sous culture de mil.*



**Figure 7 :**

*Évolution du coefficient de variation de l'humidité du sol sous mil en 1992.*

La figure 7 montre, durant le cycle hydrologique de 1992, l'évolution du coefficient de variation (CV) des données humidité du sol ainsi collectées. La culture de mil est prise comme exemple. En cette station qui est la plus hétérogène des deux aires étudiées, les remarques qui suivent sont de portée générale :

- dans les 50 premiers centimètres du profil, l'hétérogénéité est ordinairement très importante (plus de 300 %) et ne devient acceptable que durant la saison des pluies ;
- en dessous de cette zone, la variabilité des mesures diminue très rapidement pour se fixer vers 20-25 %.

Quant à l'indice de précision, il se situe généralement entre 6 et 12 % pendant la plus grande partie de l'année. Il y a une perte de précision momentanée et l'erreur peut atteindre 22 % en périodes pluvieuses, lorsque les mesures interviennent pendant la redistribution des eaux de pluie.

Il s'ensuit que le stock d'eau du sol a été déterminé à 10 % près dans la rhizosphère, au cours du suivi. À cette échelle, l'évolution hydrique saisonnière peut être cernée et les disparités intersites appréhendées. Pour ce qui est des couches superficielles du profil, dans les cinq premiers centimètres notamment, l'imprécision des mesures est inacceptable, d'autant plus que dans cette zone l'humidimètre à neutrons est impropre à cette détermination.

## DISCUSSION

### **LE DÉTERMINISME DE LA DISPERSION DE L'EAU DU SOL**

Divers faits et processus, contribuent à la variabilité spatio-temporelle de l'eau du sol. L'ensemble assez complexe, est néanmoins bien connu et très bien analysé : GASCUEL-ODOUX 1987. Dans cet article, nous ne mentionnons que les faits généraux particularisant les stations étudiées.

La dispersion pluviométrique initie l'hétérogénéité de l'eau du sol. Sa nullité à l'échelle micrométéorologique a été vérifiée pendant l'expérience.

L'effet de la dispersion pluviométrique est généralement relayé par les phénomènes : d'interception par le feuillage, d'égouttement direct au travers et d'écoulement le long des troncs. Or, la formation végétale est ouverte. La strate ligneuse occupe à peine 15 % de la surface terrière et les plages de sol nu et compacté sont nettement plus nombreuses que les cuvettes et dépressions où se concentre la végétation. Celle-ci a donc naturellement, peu d'impact sur la redistribution pluviométrique dans les conditions de la jachère. Dans ce contexte, l'implantation de la culture devrait normalement augmenter la variabilité tout en régularisant la distribution. Les résultats de l'analyse de la variance et du variogramme dans les deux sites indiquent une augmentation de l'amplitude ou de l'hétérogénéité des deux paramètres (cf. ci-dessus). Les disparités spatio-temporelles des semis et resemis successifs ainsi que des travaux et façons culturaux effectués manuellement, en sont responsables.

La redistribution de l'eau de pluie et la variabilité spatiale de l'alternative infiltration-ruisellement qui en résulte sont donc largement dominées par la rugosité de l'interface sol-végétation où de nombreuses disparités dans la microtopographie, le recouvrement végétal : (SICOT, 1983) et l'état de la surface du sol (encroûtement : CASNAVE et VALENTIN 1989, compactage : SICOT 1980, effritement : MARTY et MAERTENS 1969...) s'enregistrent.

Les inducteurs de disparités hydriques susmentionnés, qui s'appliquent plus particulièrement à la surface et aux couches superficielles du sol, régissent les modalités et l'intensité de la pénétration de l'eau dans le profil : axe d'écoulement, sites de concentrations hydriques.

Ils sont par ailleurs responsables de l'instabilité de la configuration spatiale de l'eau du sol. Indépendamment des fluctuations du tapis végétal, la microtopographie et l'état de la surface du sol varient en effet, sous l'influence de l'érosion éolienne et hydrique : accumulation ou déflation de particules fines transportées par l'harmattan en saison sèche, érosion, transit et colluvionnement par les flux de ruisellement superficiel. Des dépôts éoliens de 15 cm d'épaisseur ont été observés au contact des tubes neutroniques ainsi qu'un ruisellement diffus en réseau d'axes d'écoulement anastomosés, lors des précipitations.

Les autres facteurs de variation hydrique conditionnent le devenir de l'eau infiltrée : l'emmagasinage *in situ*, les mouvements dans le profil, l'absorption racinaire et l'évapotranspiration, ... Les caractéristiques physiques du profil : texture, structure, capacité de rétention, ... sont fortement impliquées : DAOUA *et al.*, (1990).

Nous terminons cet examen des facteurs inducteurs des disparités hydriques du sol, en mentionnant l'effet de la présence d'une couche indurée plus ou moins perméable à profondeur variable dans le profil. Le ralentissement de flux qui en résulte peut entraîner la formation de nappes temporaires pouvant modifier le taux d'humidité dans les horizons supérieurs.

L'incidence de ces divers facteurs se traduit par une dispersion d'étendue moyenne : GASCUEL-ODOUX, *loc. cit.*. Les difficultés rencontrées résident dans la juxtaposition des disparités extrêmes, juxtaposition qui confère une configuration en mosaïque à l'hétérogénéité hydrique.

Une telle structure est assez difficile à appréhender. Elle se traduit par un variogramme hétérogène. Sa description et sa formulation pour autant que faire se peut, se situent à une échelle inférieure au pas des mesures. Celles-ci peuvent être considérées, ainsi que nous l'avons souhaité pour les besoins du programme, comme indépendantes à l'échelle micrométéorologique. Cependant, les dérives quasi linéaires enregistrées dans les variogrammes, indiquent l'existence d'autocorrélations hydriques locales caractérisant la parcelle. La comparaison des deux sites d'étude montre que l'hétérogénéité est à peu près du même ordre à cette échelle : fluctuation du coefficient de variation respectivement de 16 à 20 % et de 16 à 25 % sous jachère et sous mil. On peut néanmoins mentionner les effets des travaux culturaux sous mil qui entraînent une légère augmentation de la variabilité : 25 % par rapport à 16 % en début d'humectation et une perturbation de l'évolution saisonnière de ce paramètre. Sous l'effet des travaux (semis, sarco-binages) l'hétérogénéité du taux d'humidité sur 1 mètre de sol est relativement élevée en pré-humectation, au démarrage de la culture. Elle diminue sensiblement en pleine humectation, quand celle-ci est bien installée. Sous jachère au contraire, l'hétérogénéité sur 1 mètre augmente globalement avec l'humectation.

En ce qui concerne le contrôle de cette dispersion hydrique et l'estimation de la moyenne spatiale, deux stratégies sont possibles :

- le choix des sites les plus représentatifs autrement dit les mieux corrélés à cette moyenne ;
- la constitution d'échantillons composites permettant l'estimation de cette moyenne.

La première stratégie répétée dans le temps revient à sélectionner les sites les plus stables. Deux à trois placettes suffisent en général : l'introduction de nouveaux sites peu stables augmentent peu en effet, et de façon non significative,



le coefficient de corrélation. Mais, les estimations peuvent manquer de précision en raison du manque de rigidité des régressions et de l'instabilité de la configuration hydrique. En définitive, cette stratégie repose sur les résultats d'un échantillonnage qui doit être effectué en préliminaire et les régressions qui s'ensuivent sont biaisées si les sites sélectionnés ont participé à l'élaboration de la moyenne. Exigeante quant à la stationnarité de la structure, elle n'est guère adaptée au milieu d'étude.

La seconde stratégie qui permet d'exécuter conjointement : l'analyse de la dispersion hydrique, le choix des emplacements de mesure et l'installation rapide du dispositif expérimental, est celle que nous avons adoptée. Elle a été décrite et discutée ci-dessus. Nous insistons cependant sur les possibilités offertes de minimiser les biais de mesure dus aux changements de la configuration hydrique en périodes pluvieuses et de contrôler efficacement l'étendue de la variation. Cette méthodologie est empirique et limitée par les particularités locales. Il est à noter cependant : que l'ordre de grandeur du coefficient de variation est identique pour les deux sites. Il est sans doute constant pour la région, compte tenu du peu d'incidences de conditions extrêmes s'agissant de la topographie (versant et bas de pente) et du mode d'exploitation (jachère et culture traditionnelle) du terrain. Sur cette base, et en intégrant la typologie du paysage et des placettes de mesures (microbuttes, microdépressions, plages de sol nu, reliques de termitière, ...), il est possible de replacer toute mesure singulière ainsi que la moyenne spatiale correspondante dans une gamme de variation définie.

Soit en effet  $x$ , une mesure hydrique effectuée dans ce contexte, dans un site quelconque. En l'assimilant à une estimation de la valeur moyenne, le coefficient de variation et l'indice de précision s'écrivent :

$$CV = s / \bar{x} \cong s / x = k \quad \text{et} \quad P = ts / \bar{x} \sqrt{n} = t S_{\bar{x}} / \bar{x} \cong t S_{\bar{x}} / x = l.$$

Au seuil de probabilité voulu, mesuré par  $t$  le coefficient de Student, la variée  $x$  et sa moyenne  $\bar{x}$  varient respectivement sur :  $x \pm k\bar{x} = x(1 \pm tk)$  et  $x \pm P\bar{x} = x(1 \pm l)$ .

Avec 25 % comme coefficient de variation des données de stock hydrique et 15 % comme précision sur la moyenne des mesures, l'intervalle de confiance à 95 % d'une réserve de 100 mm d'eau est :  $100(1 \pm 2 \times 25 \%) = [50 - 150]$  mm et la valeur moyenne se situe entre :  $100(1 \pm 15 \%) = [85 - 115]$  mm.

Des considérations sur la situation topographique de la station et microtopographique de la placette de détermination peuvent permettre de préciser vers les valeurs basses ou élevées par rapport à la moyenne.

## CONCLUSION

L'eau des précipitations atmosphériques est redistribuée de façon hétérogène dans le sol. La juxtaposition de disparités hydriques extrêmes y édifie une configuration en mosaïque de sites secs, humides et intermédiaires. Cette configuration ainsi définie est permanente quant au type, mais instable et sensible au mode d'exploitation du milieu. Sa description et sa formulation doivent reposer sur une analyse fine et répétitive à très grande échelle (au sens géographique).

Les impératifs de faisabilité de l'échantillonnage et d'exécution de l'expérience Hapex-Sahel ont imposé un pas de mesure de 50 m à la grille d'échantillonnage. Cette distance intersite de mesure ne permet pas d'appréhender la microstructure de la mosaïque, mais on accède aux relations hydriques à l'échelle micrométéorologique. L'analyse est perturbée par les fluctuations induites par la micro-configuration sous-jacente. Néanmoins, les autocorrélations locales ont été étudiées et les effets de la morphologie du paysage et du mode d'exploitation détectés. En raison de l'instabilité structurelle, le contrôle de la dispersion hydrique à partir d'échantillons composites permettant d'estimer les moyennes locales et leurs intervalles de variation a été préféré à des méthodes basées sur les corrélations intersites. Le dispositif de mesure mis en place a permis de bien maîtriser l'hétérogénéité des données, lesquelles ont été collectées avec une précision voisine de 10 %. Ces résultats de variabilité et précision des données hydriques sont, par ailleurs, susceptibles d'extrapolation à l'échelle régionale et de faciliter la production et l'interprétation d'autres mesures.

## BIBLIOGRAPHIE

- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration. Éd. Orstom, 229 p.
- DAOUDA OUSMANE S., SICOT M., THIERRY J. M., 1990. Étude de l'hétérogénéité spatiale d'un champ expérimental de Niamey : corrélation entre les stocks et les caractéristiques pédologiques. Journées du G.F.H.N., Aix en Provence, nov. 1990, commun. n° 8.
- ESTÈVES M., GUALDE R., LAPETITE J.M., 1993. Rapport des campagnes hydrologiques 1910 et 1992. Projet Hapex-Sahel. Avril 1993, Orstom, multigr. 42 p., 9 annexes.
- GALLE S., SICOT M., LAOUALI D., 1991. Stratégie d'échantillonnage pour l'estimation d'une moyenne spatiale : suivi de l'état hydrique dans l'expérience Hapex-Sahel. Journées Seminform 5 *statistique impliquée Orstom* Montpellier 2-4 sept. 1991.
- GASCUEL-ODOUX, 1987. Variabilité des propriétés du sol, méthodes et résultats ; cas d'une seule variable : revue bibliographique. *Agronomie*, 7, 61-71.
- HOEPFFNER M., GOUTORBE J.P., SELLERS P., TINGA A., 1991. Hapex-Sahel experiment plan. 39 p. multigr.
- RUELLE P., BEN SALH D., VAUCLIN M., 1986. Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale d'une parcelle agronomique. Application à l'échantillonnage. *Agronomie*, 6, 529-539.
- SICOT A.M., 1980. Mesure de la teneur et des transferts hydriques en milieu sahélien : difficultés rencontrées dans les sols du bassin versant de la Mare d'Oursi, en Haute Volta. Comm. Journées G.F.H.N., Toulouse 18-20 nov. 1980, 23 p. multigr.
- SICOT A.M., 1983. Variabilité de la teneur en eau et de la réserve hydrique du sol en milieu sahélien : 1. Dispersion spatiale et rationalisation du réseau de mesure. *Bull. G.F.H.N.*, 14, 73-94.

- SICOT A. M., 1983. Variabilité de la teneur en eau et de la réserve hydrique du sol en milieu sahélien: 2. Évolution temporelle de la dispersion spatiale, simplification du réseau initial et schématisation du fonctionnement hydrodynamique. Bull. G.F.H.N., 15, 103-23.
- THIÉRY J.M., 1994. Les applications de *Voyons* pour des recherches en pays tropicaux. Commun., 2<sup>e</sup> Coll. Afr. sur la Rech. en Inform. Ouagadougou (Burkina-Faso) 12-18 octobre 1994, 4 p.