

# Stratégie d'échantillonnage pour l'estimation d'une moyenne spatiale : Suivi de l'état hydrique dans l'expérience HAPEX-Sahel

S.Galle<sup>a</sup>

M.Sicot<sup>b</sup>

D. Laouali<sup>c</sup>

## 1 Introduction

Dans le cadre de l'expérience HAPEX Sahel, nous nous proposons de suivre le bilan hydrique de plusieurs parcelles de végétation homogène, représentatives des principaux types de végétation rencontrés au Sahel. La présente communication s'intéresse au suivi du stock hydrique de ces parcelles, la pluie et l'évapotranspiration étant mesurées par ailleurs.

Les variations spatiales de l'état hydrique à l'intérieur d'une parcelle, résultent à la fois d'un processus aléatoire (la pluie), et de caractéristiques physiques (état de surface: végétation et croûte superficielle, sols, enracinement, microtopographie principalement). La connaissance exhaustive de ces paramètres physiques et la quantification de leur influence sur le milieu, n'étant pas envisageable, un échantillonnage statistique de l'état hydrique est nécessaire.

Dans cet article, nous proposons une analyse statistique permettant de minimiser le nombre de sites de mesure. Nous exposons successivement : la méthodologie mise en oeuvre, et un exemple d'application à une parcelle de mil.

## 2 Méthodologie

### • Hypothèse de stabilité temporelle

Le protocole d'échantillonnage est basé sur l'hypothèse de stabilité temporelle de la répartition spatiale de l'état hydrique (Vachaud *et al.*, 1985). C'est-à-dire que l'on suppose que ce sont toujours les mêmes points qui présentent une forte (ou faible) réserve hydrique, quel que soit l'instant considéré. D'un point de vue physique, le concept de stabilité temporelle est réaliste, puisque la variabilité spatiale intraparcellaire de l'état hydrique est principalement due aux états de surface des sols (Casenave et Valentin, 1989), qui sont peu variables dans le temps. On peut alors donner une estimation de la répartition fréquentielle de l'état hydrique de la parcelle à tout instant, à partir d'un nombre réduit de points (moyenne et moyenne plus ou

---

<sup>a</sup>ORSTOM Niamey

<sup>b</sup>Institut des Radio Isotopes Niamey

<sup>c</sup>Faculté des Sciences Niamey

moins un écart-type pour une distribution gaussienne par exemple). Cette démarche nécessite une étude préalable de la variabilité spatiale.

#### • Etude de la variabilité intraparcellaire

La variabilité spatiale intraparcellaire est étudiée pour différentes conditions hydriques, à partir d'une trentaine de points de mesure. Ces sites de mesure sont régulièrement répartis sur une grille à maille carrée recouvrant l'ensemble de la surface considérée. Cet échantillonnage permet d'inférer la répartition fréquentielle et le variogramme, correspondant à un état hydrique donné. La répétition de cet échantillonnage pour différents états hydriques (différentes dates), permet de vérifier (ou d'infirmer), l'hypothèse de stabilité temporelle. A partir de cette analyse, trois sites sont choisis pour y implanter des appareils de suivi régulier: un site correspondant à la moyenne, et deux autres situés à plus ou moins un écart type. Afin d'avoir des données indépendantes, les trois sites seront de plus choisis à une distance supérieure à la portée du phénomène, donnée par le variogramme.

Après un échantillonnage statistique systématique, seuls trois points de mesure sont ainsi suffisants pour assurer le suivi du stock hydrique d'une parcelle.

### 3 Exemple d'application de la méthodologie d'échantillonnage

Cette méthodologie a été appliquée à l'échantillonnage de l'eau du sol en zone soudano-sahélienne, soixante kilomètres à l'est de la ville de Niamey au Niger.

La parcelle d'étude de 300 m x 300 m à faible pente (environ 1%) est cultivée en mil, principale culture vivrière du pays. Elle est assez hétérogène quant à ses caractéristiques physiques, façonnées par l'érosion hydrique et éolienne. Les nombreuses disparités des états de surface du sol qu'on y rencontre : plages de sol nu, reliefs de termitières, zones du tapis végétal herbacé de densité variable, microbuttes à voile de sable éolien, micro-cuvettes à pellicule squameuse..... sont autant de facteurs de dispersion de l'humidité du sol, qui motivent l'échantillonnage des sites de mesure.

Les sites, numérotés de 1 à 36, sont répartis aux noeuds de la grille d'échantillonnage susmentionnée, grille dont la maille carrée a 50 m de côté.

Tableau 1: Numéro des sites de la parcelle de mil

16	26	36	46	56	66
15	25	35	45	55	65
14	24	34	44	54	64
13	23	33	43	53	63
12	22	32	42	52	62
11	21	31	41	51	61

A ce stade, l'étude est essentiellement basée sur le profil d'humidité pondérale, établi en chaque site à partir de carottes de sol prélevées de 10 en 10 cm jusqu'à 1 m

de profondeur (zone de variabilité maximale de l'eau du sol). La densité apparente du substrat n'étant pas encore disponible, la réserve hydrique du sol ne peut pas être calculée. Elle est approchée par un indice de stock d'eau (IS) constitué par le cumul des taux d'humidité pondérale sur une tranche de sol donnée. Cet indice nous permet d'intégrer la variabilité de l'humidité le long du profil.

Dans le but de contrôler la stabilité de la répartition de l'eau du sol, les relevés de profils hydriques ont été effectués le 25 Juin et le 19 Août 1991, dates auxquelles correspondent respectivement un état de dessèchement et un état d'humectation accusés du substrat.

## 4 Résultats

### 4.1 La variabilité de l'état hydrique du sol

La figure 1 illustre avec les profils hydriques relevés le 25 Juin en 3 sites (sites 26, 31 et 66) l'hétérogénéité verticale et latérale du taux d'humidité du sol. Les profils des sites 26 et 66 assimilables, l'un au profil des humidités minimales, l'autre au profil des humidités maximales donnent l'amplitude de variation. Le profil du site 31 permet de se figurer les modalités des disparités hydriques entre profils en considérant les combinaisons possibles de la variation de l'humidité entre la surface et la profondeur du sol.

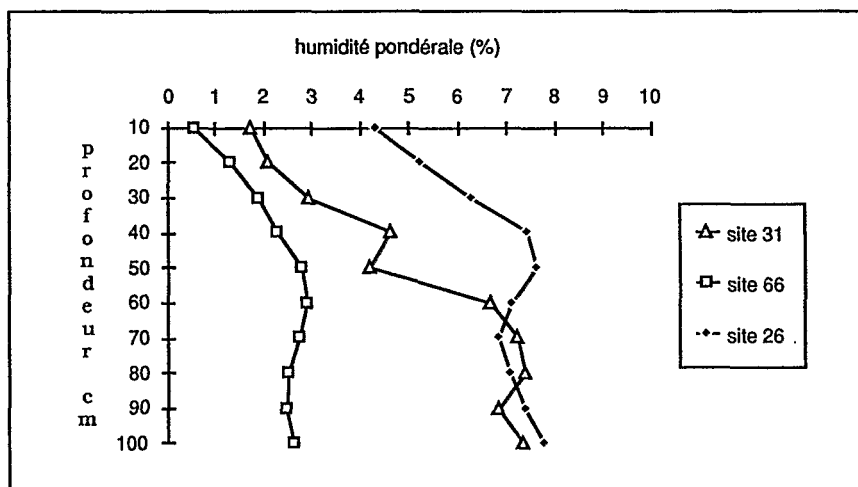


Figure 1: Exemple de variabilité des profils d'humidité pondérale sous culture de mil (25 juin 1991).

La dispersion spatiale du stockage de l'eau qui en découle est cartographiée aux deux dates précitées, en prenant l'indice du stock d'eau sur 1 m comme critère (fig 2a et 2c). La surface correspondant à un indice de stock supérieur à la moyenne de l'événement est hachurée. Il en ressort que l'eau est irrégulièrement distribuée et que les configurations hydriques aux deux dates diffèrent sensiblement en certains points, tout en présentant certaines analogies quant à la répartition globale de l'eau dans les parties nord-ouest et sud-est de la parcelle La variabilité spatiale

mesurée par le coefficient de variation est respectivement de 23% et de 16%.

## 4.2 Analyse fréquentielle de l'indice de stock d'eau du sol.

Les fonctions de répartition des valeurs ponctuelles de l'indice de stockage de l'eau aux deux dates (Figure 3 , courbes A et B), sont assimilables à des lois normales dont les caractéristiques sont données ci dessous.

	A	B
moyenne	45	67
écart-type	10	11
variance	103	119
CV	23%	16%

Il découle de la comparaison des rangs des différents sites de mesure dans les distributions fréquentielles, que l'hypothèse de stabilité temporelle de la répartition spatiale de l'eau n'est que partiellement vérifiée. Seuls une douzaine de points (reportés sur la figure 3) apparaissent stables sur les 36 de l'échantillon. C'est dans ce noyau de stabilité que doivent être sélectionnés les sites de suivi de l'humidité du sol : site 42 pour le profil moyen, sites 45 et 23 pour la moyenne plus ou moins un écart-type. Pour une vision plus synthétique de la stabilité temporelle de chaque site de mesure, on a reporté son rang dans la distribution aux deux dates, en fonction du rang moyen (Figure 4). La dispersion du nuage autour de la bissectrice indique une variation importante pour les valeurs de stock moyennes (allant jusqu'à 12 places), alors que les valeurs extrêmes restent plus stables dans leur rang. Les 12 sites stables sont représentés par les 12 couples de points proches de la bissectrice.

## 4.3 Analyse des relations de dépendance de l'eau du sol.

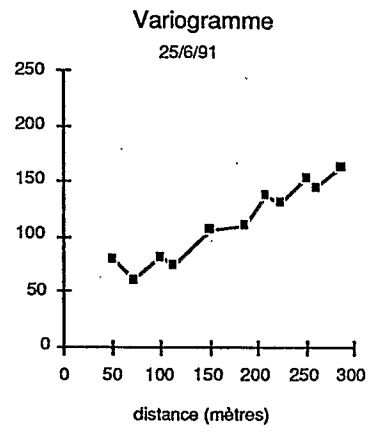
Le variogramme expérimental des données d'indice de stock d'eau du 25 Juin (figure 2b), et celui du 19 Août (2d) sont quasiment linéaires, de même pente, et de pèpèpe très forte, traduisant une importante variabilité locale. En effet, celle-ci (estimée à 40) explique plus de 60% de la variance de l'écart de deux sites distants de 50 mètres.

Une lecture plus fine, nous amène à envisager un palier en début de variogramme (pour des distances comprises entre 50 et 150 mètres), puis une dérive due à une tendance générale du champ: opposition nord ouest-sud est. L'existence de ce palier, de valeur proche de la variance des événements, ne peut être confirmée que par une analyse plus fine du comportement à l'origine : en procédant à un échantillonnage plus dense.

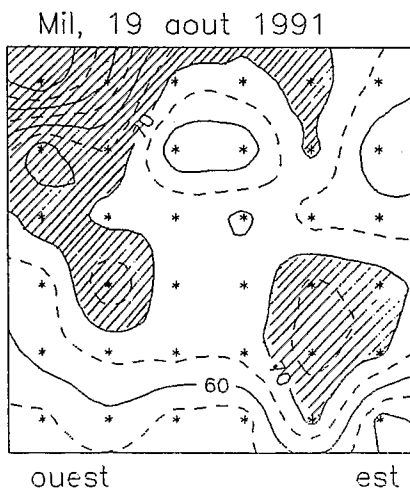
A partir de notre échantillonnage, on constate une certaine auto-dépendance du "stock d'eau" à l'échelle de la parcelle. Nos trois sites de mesure permanents (42, 45 et 23) sont distants de plus de 100 mètres. les uns des autres, ils sont indépendants localement, mais liés par la dérive du champ.



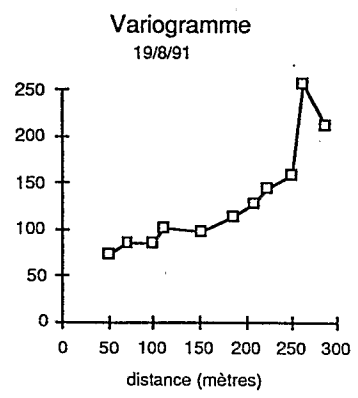
a



b



c



d

Figure 2: Variation spatiale de l'indice de stock hydrique sur la parcelle de mil aux 25 juin et 19 août 1991, et les variogrammes associés.

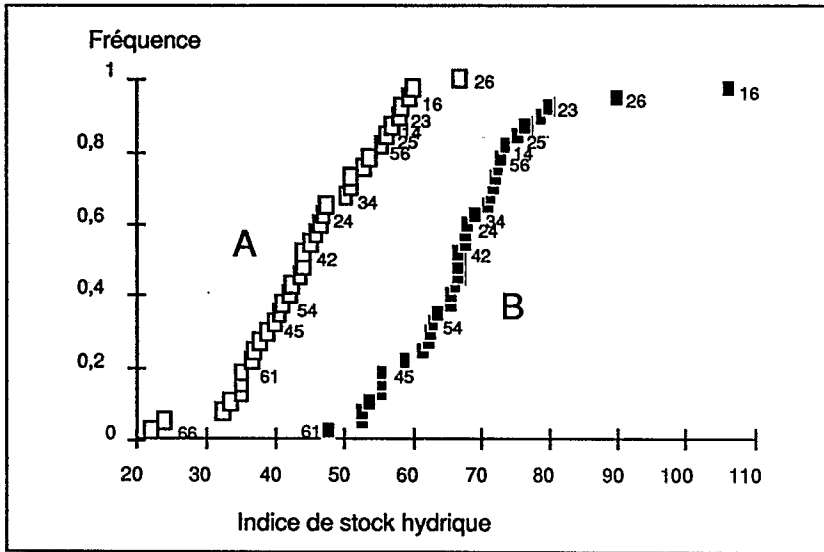


Figure 3: Fonction de répartition de l'indice de stock hydrique sur 1 mètre, le 25 juin 1991 (A), et le 19 août 1991 (B)

#### 4.4 Discussion

La capacité du réservoir que constitue le sol pour l'eau, dépend de la porosité développée par la structure ainsi que par la texture, laquelle assure en outre la rétention de l'eau in situ par les forces matricielles développées. L'état d'humectation ou de vidange du réservoir résulte d'un ensemble complexe de facteurs antagonistes occasionnant des gains (gains dus aux pluies, aux transferts hydriques du ruissellement conditionnés par les états de surface, et du drainage,) et des pertes hydriques (pertes par extractions atmosphériques et racinaires, par ruissellement et drainage).

L'hétérogénéité hydrique du sol a donc une double origine : la variabilité texturo-structurale du substrat pédologique et la variabilité des transferts hydriques affectant l'eau stockée.

Aux états extrêmes de dessèchement et d'humectation, les configurations hydriques dérivent d'équilibres statiques, liés aux caractéristiques physiques du sol. Reflets de la distribution spatiale des valeurs ponctuelles de ces caractéristiques quasi immuables, ces configurations hydriques devraient être similaires. D'où l'hypothèse de stabilité temporelle de la répartition de l'eau du sol.

Aux états intermédiaires, les configurations de la dispersion hydrique devraient être plus disparates étant donné le cortège de facteurs antagonistes précités qui régissent l'état de remplissage du réservoir.

En ce qui concerne l'instabilité constatée dans la répartition de l'eau du sol, on doit d'abord noter que si le sol peut être considéré comme proche de l'état d'humectation maximale au 19 Août 1991, l'état de dessèchement au 25 Juin ne

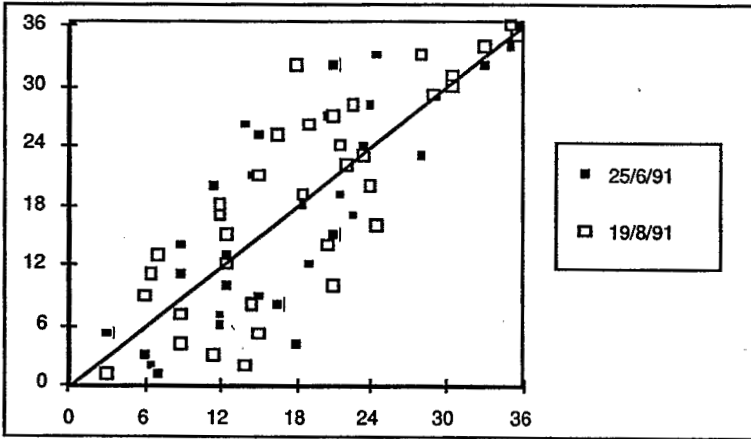


Figure 4: Ecart entre le rang observé et le rang moyen dans la distribution pour chaque site de mesure.

peut être maximal, la texture sableuse du matériau imposant un taux d'humidité minimum pour les carottages. Par ailleurs, l'état structural en terrain sableux est instable et s'effondre sous humectation, réduisant la porosité et donc la quantité d'eau emmagasinable.

Il s'ensuit que l'instabilité hydrique enregistrée en échantillonnant l'humidité du sol est due à la fois à l'insuffisance du dessèchement du sol au 25 Juin 1991 et aux modifications des disparités structurales survenues ultérieurement en cours d'humectation du substrat. Les travaux cultureux sur la culture de mil sont aussi cause de la variabilité des états de surface et donc de la capacité d'infiltration des sols.

Quant à l'autodépendance des mesures hydriques sur des distances avoisinant 250 m, elle résulte de l'incidence de flux hydriques induits par la géomorphologie du site expérimental, lequel se trouve sur la rive droite d'un kori (désignation d'un cours d'eau temporaire au Niger), situé plus à l'est. L'indépendance des données recueillies à plus grande échelle serait liée aux disparités du micro-relief, des états de surface, de la couverture végétale principalement.

## 5 Conclusion

L'application du modèle d'échantillonnage statistique proposé pour le suivi de l'humidité du sol, se heurte à des difficultés inhérentes à la nature du matériau constitutif du sol, à la situation géomorphologique du site expérimental et à l'incidence des travaux cultureux sur la culture du mil. L'effritement du sol sablonneux à l'état sec, son instabilité structurale à l'état humide réduisent la stabilité de la répartition de l'eau dans le sol.

Néanmoins cette méthodologie d'échantillonnage aboutit à isoler un noyau de

stabilité dans lequel peuvent être sélectionnés les sites de mesures. Un troisième échantillonnage est cependant nécessaire pour confirmer les tendances observées à partir de deux évènements.

## Références bibliographiques

- A.Casenave et C. Valentin, 1989. Les états de surface de la zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration. Ed. de l'ORSTOM, 229 pp.
- G. Vachaud, A. Passerat de Silans, P. Balabanis, and M. Vauclin, 1985. Temporal stability of spatially measured soil water Probability density function. Soil Sc. of Am. J., Vol 49 n° 4, pp 822-828.