

LE REPORT HYDRIQUE COMME PRINCIPAL CRITERE DE PREDICTION DU RENDEMENT EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE

Valet S.* et Sarr P. S. **

* Université de Poitiers - Sciences Fondamentales et Appliquées.

Pédologie-Pétrologie 40, avenue du Recteur Pineau. 86022. Poitiers. Cedex.

Tél : 05.49.45.59.55 Fax : 49.45.40.17 e-mail : valet@hermes.univ-poitiers.fr.

** ISRA- Institut Sénégalais de Recherche Agronomique. BP, 199, Kaolack, Sénégal.

RESUME

En zone soudano-sahélienne, le ruissellement et l'érosion concomitante, malgré la forte sécheresse apparue en 1968, affectent tous les écosystèmes, accroissant exponentiellement leur dégradation. Elle provoque une chute drastique des potentialités agricoles du milieu par la baisse de fertilité des sols et la diminution de l'alimentation en eau des cultures. Elle explique l'effondrement de la production vivrière et l'impossibilité d'implanter une agriculture intensive durable. De nombreux chercheurs ont démontré le rôle primordial de la satisfaction hydrique sur la production agricole, quel que soit le climat, et de l'effet dommageable du stress hydrique lors des phases sensibles de la culture

Ainsi, la connaissance du fonctionnement hydrique des écosystèmes s'avère indispensable et le report hydrique apparaît comme un des principaux facteurs d'amélioration des stocks hydriques du sol. Ce dernier est une composante bénéfique du ruissellement qui se définit comme une *"irrigation naturelle, complémentaire et simultanée à la pluie qui l'a générée en fonction de l'évolution de l'état de surface."* Il explique ainsi la grande variabilité des rendements observée sur les versants comme à la parcelle.

Désormais, l'identification des critères de formation du report hydrique et son estimation sont nécessaires pour comprendre l'élaboration du rendement des cultures vivrières en zone à risque de stress hydrique sur les différents écosystèmes. Cette approche conduit au concept de gestion et valorisation agro-forestières du report hydrique pour la restauration des écosystèmes et le choix de systèmes de culture durable adaptés.

Mots-clés : zone soudano-sahélienne, ruissellement, ETR, report hydrique, drainage, hydrosystèmes, mil.

RUNON AS MAIN CRITERION OF MILLET YIELD IN SUDANO-SAHELIAN ZONE

Key-words : Sudano-sahelian zone, runoff, runon, drainage, RET, millet, hydrosystems.

INTRODUCTION

En zone soudano-sahélienne, la sécheresse, sans précédent, qui sévit depuis 1968 a provoqué les effets les plus pervers sur le plan écologique (Rognon, 1991). Il a été constaté que, paradoxalement, le ruissellement avait augmenté, entraînant une aggravation de l'érosion (Roose, 1989). Car dans cette zone, sur le versant comme à la parcelle, Valet (1985 a, b) a démontré que l'extrême variabilité du ruissellement et de l'érosion concomitante est bien la cause dominante de la modification et de la variabilité de l'alimentation en eau, comme d'autres chercheurs l'avaient noté (Brubaker et al., 1994). Elle influence le ruissellement et le drainage en plus de la dégradation des propriétés pédologiques superficielles et profondes (Kachanoski et al., 1985). Cela résulte de la redistribution du ruissellement contrôlé par le micromodelé qui, localement, a un effet bénéfique sur la reconstitution des stocks hydriques. En effet, ce report hydrique, même en sol sableux, assure une reconstitution des stocks hydriques très rapide et importante sur le versant et dans la vallée ou dans les sillons interdunaires (Hanna et al., 1983; Kachanoski et al., 1985; Valet et Sarr, 1989; Serpantié et Lamachère, 1989; Valet et al., 1993; Andriessse et Fresco, 1991; Delhoume, 1990; Sicot et al., 1991). Ce phénomène s'exerce quelles que soient la texture et la capacité de rétention (Daouda et al., 1991; Valet, 1996).

Ce report hydrique ou ruissellement entrant (Hanna et al., 1983; Kachanoski et al., 1985; Valet 1985 a et c et 1995; Lamachère et Serpantié, 1989) peut être considéré comme une *"irrigation naturelle, complémentaire et simultanée à la pluie qui l'a générée en fonction de l'évolution de l'état de surface."* (Valet, 1996). Ce report n'a pas été pris en compte dans la plupart des bilans hydriques par ceux-là même qui l'ont pourtant remarqués (Gerrard, 1981; Hanna et al., 1983; Kachanoski et al., 1985; Evett et Dutt, 1985; Flitcroft et al., 1991; Andriessse et Fresco, 1991). D'autres se sont intéressés aux seules variables de réserve hydrique pour estimer l'amélioration du rendement (Valet et Sarr, 1989; Lamachère et Serpantié, 1989; Delhoume, 1990; Andriessse et Fresco, 1991) Toutefois, Valet et al. (1993), pour le centre Sénégal, grâce à la simulation du ruissellement et du report hydrique à partir de l'observation des états de dégradation de la surface et des risques de ruissellement qui leur sont liés (Casenave et Valentin, 1989), ont démontré l'effet du report hydrique sur l'amélioration de l'alimentation en eau du mil.

Il est donc intéressant d'identifier l'existence du ruissellement mais surtout du report hydrique en conditions pédoclimatiques les plus étendues et d'en mesurer l'effet sur la modification de l'offre hydrique aux plantes et l'extrême variabilité des rendements qu'elle induit.

Cette étude a pour objectif :

- i) d'identifier et de hiérarchiser les facteurs morphopédologiques pertinents qui expliquent la genèse du report hydrique,
- ii) d'évaluer son influence sur l'amélioration de l'alimentation hydrique
- iii) de mesurer son impact sur l'élaboration du rendement du mil.

I METHODOLOGIE ET MATERIAU

1.1 Description du modèle de bilan hydrique

Le modèle utilisé est un modèle fonctionnel capacitair (IRAT-SOPRA, 1989) qui intègre une fonction de ruissellement basée sur le type d'encroûtement (Albergel et al., 1991). Ainsi, 3 équations prédictives, correspondant à 3 niveaux de dégradation les plus courants, ont été introduites (Tableau 1) (Casenave, 1982; Casenave and Valentin, 1991). La lame d'eau ruisselée est calculée ainsi :

$$L_r = a P + b IK + c IK \cdot P + d \quad (\text{Casenave, 1982}) \quad \text{avec :}$$

L_r lame ruisselée en mm, P pluviosité en mm, IK indice de Kohler en mm.

L'indice de Kohler est un indice de l'humidité antérieure du sol avec $IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1})e^{-\alpha t}$
où : IK_n est la valeur de l'indice caractérisant l'humidité du sol avant la pluie n

IK_{n-1} est la valeur de l'indice avant la pluie $n-1$,

P_{n-1} est la hauteur de la pluie $n-1$,

t est le temps, en fraction de jours, séparant la fin de la pluie $n-1$ du début de la pluie n ,

α est le coefficient d'ajustement égal à 0,5. Ce coefficient α dépend du type de sol (Evet et Dutt, 1985).

A partir de ces observations, les états de surface ont été regroupés en 3 classes de dégradation : faible, moyenne et forte (Tableau 1).

Tableau 1 : Coefficients des équations de ruissellement en fonction du degré de dégradation superficielle et des états de surface.

Dégradation superficielle	Type de croûtes	Lame ruisselée	a	b	c	d
Faible	St1-C1	Lr1	0,20	0,03	0,004	-3
Moyenne	St2-C2	Lr2	0,35	0,04	0,004	-3
Forte à très forte	ERO-C3	Lr3	0,90	0,05	0,002	-10

ST1-2 : croûte structurale à 1, 2 microhorizons.

C1-2-3 : état de surface cultivé à dégradation croissante.

ERO : croûte d'érosion : 1 microhorizon plasmique.

Mais, pour tenir compte de la succion matricielle, l'algorithme d'Eagleman a été employé (Eagleman, 1976). Ce modèle a été calibré en de nombreuses régions soudano-sahéliennes (Fréteaud *et al.*, 1987; Chopart et Vauclin, 1990; Flitcroft *et al.*, 1991; Pérez, 1994). Le report hydrique ou ruissellement entrant dans la parcelle, calculé à partir des équations, est considéré comme une "irrigation complémentaire simultanée à la pluie qui l'a générée"

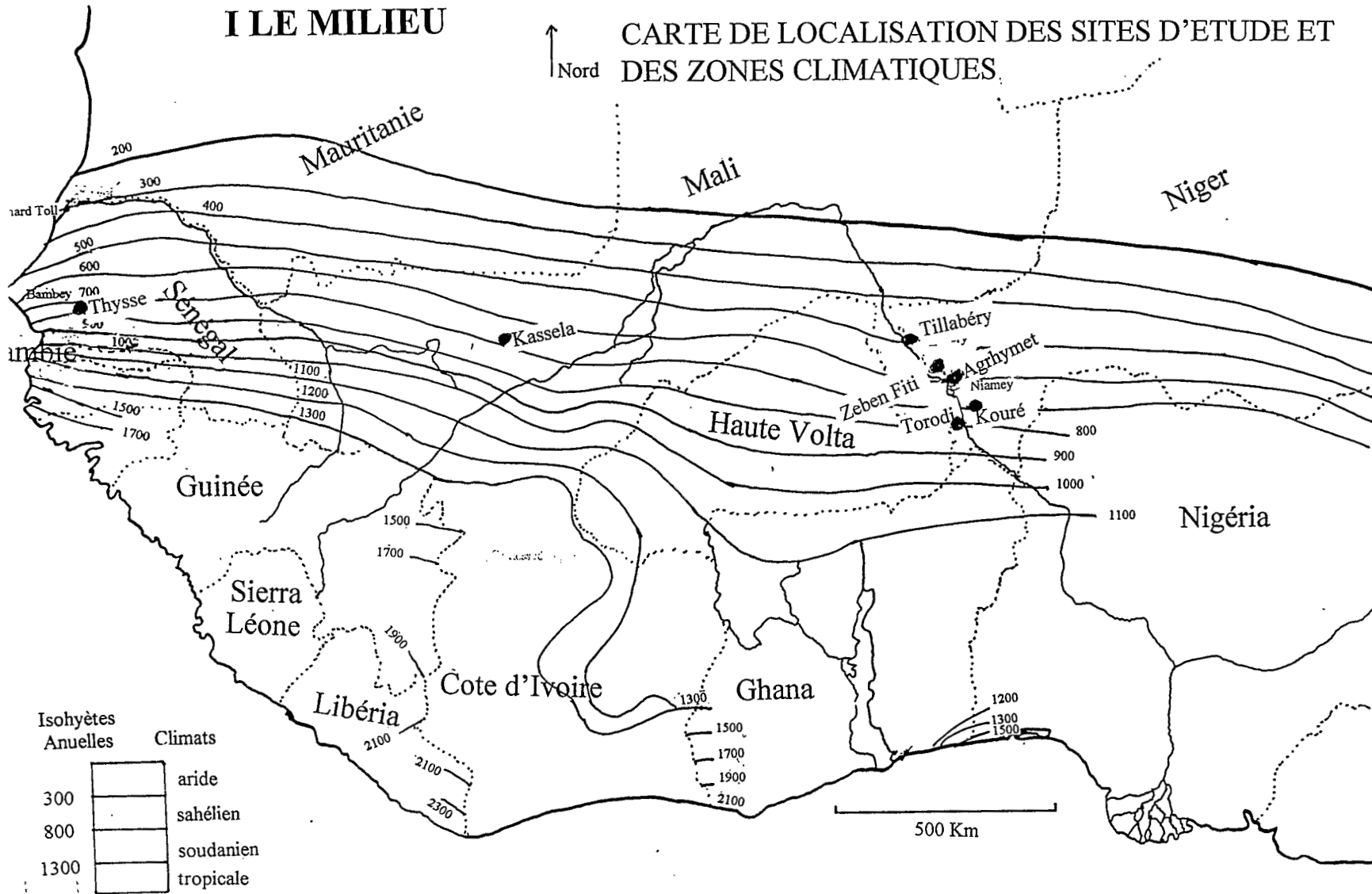
1.2 Expérimentation

L'expérimentation a été conduite en milieu paysan au Sénégal, au Niger et au Mali sur des versants qui présentaient localement des développements morphopédologiques

I LE MILIEU



CARTE DE LOCALISATION DES SITES D'ETUDE ET DES ZONES CLIMATIQUES.



Isohyètes Anuelles	Climats
300	aride
800	sahélien
1300	soudanien
	tropicale

500 Km

177

caractéristiques des zones. Elle a eu lieu à des dates différentes sur des parcelles de 20 à 65 m² échelonnées sur 8 toposéquences (Fig.1).

1.3 Climat

Le climat est du type soudanien à sahélien, caractérisé par une pluie concentrée sur 4 à 5 mois dont le total diminue avec la latitude. La pluviométrie des sites, lors des études, est consignée dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2 : Pluviométrie des zones étudiées.

PAYS	CLIMAT	LIEUX	ANNEE	Mil	PLUIE mm
NIGER	SAHELIEN	Tillabéry	1975	120j	282,1-317,6
	SAHELIEN à-	Zeben Fiti*	1990	120j	452,0
		Agrhymet**	1989	120j	522,7
	SOUDANIEN	(Niamey)	1990	120j	495,3
	SOUDANIEN		Kouré	1991	90j
Torodi			1990	120j	410,1
SENEGAL		Thyssen*	1984	90j	354,0
MALI		Kassela	1987	90j	535,0

Nota : * : 2 toposéquences. ** : au hasard sur le versant.

Or, la sécheresse, qui sévit depuis 1968, explique la faiblesse de la pluviosité mesurée lors des essais dont la baisse atteint 25 à 35% (Diop, 1996). Elle s'accompagne cependant d'un maintien de l'agressivité pluviale (Casenave et Valentin, 1989; Pérez, 1994). En effet, dans cette zone, Dacosta (1992) a calculé sur 6 ans (de 1983 à 1988), pour une récurrence décennale, des intensités de 153 mm h⁻¹ pendant 10 mn et de 85 à 95 mm h⁻¹ pendant 25 mn et 60 mm h⁻¹ pendant 40 mn, comparables à celles tombées en 1984 à Thyssé.

L'ETP est donnée par l'évaporation d'un bac classe A.

1.4 Sol

Les unités morpologues rencontrées sont les suivantes :

- sol peu évolué sur cuirasse,
- sol ferrugineux tronqué sur la carapace secondaire,
- sol ferrugineux tropical peu lessivé sur le bas glaciaire et sur sables éoliens,
- sol ferrugineux tropical à tâches et concrétions sur la terrasse colluvio-alluviale. (Bertrand, 1972 ; Gavaud, 1977 ; Angé, 1984).

Ils se sont développés sur le grès argileux du Continental Terminal à Thyssé (Sénégal), sur les migmatites à Kassela (Mali), ou sur des sables éoliens et des alluvions au Niger. Ces sols sont pauvres en cations échangeables et en phosphore, avec une faible teneur en matière organique.

Indépendamment de la formation de croûtes sous l'impact des gouttes de pluie ou de l'effet du ruissellement, la capacité d'infiltration, qui varie de 3 à 12 cm h⁻¹ est souvent inférieure à l'intensité des pluies. Ceci explique la généralisation du ruissellement observée sur ces sols, malgré les faibles pentes.

La réserve en eau utile a été déterminée *in situ* à Thyssé et à Tillabéry selon la méthode Müntz modifiée (Marcesse, 1967; Valet, 1984 b), ou estimée à partir de la nature du type de sol pour les autres régions (Valet, 1995).

15 Culture

Deux variétés de mil (*Pennisetum typhoides*) ont été semées (Souna III avec un cycle de 90 jours et mil local de 120 jours). La profondeur maximum d'enracinement du mil a été mesurée à la récolte sur 4 pieds dans les 4 angles de chaque parcelle au Sénégal et sur deux répétitions au Niger et au Mali. Cette profondeur maximum est définie comme le niveau au dessus duquel a lieu la totalité de l'enracinement. Quant aux vitesses d'enracinement, elles ont été empruntées à une étude portant sur les mêmes variétés de mil, cultivées au même niveau d'intensification, sur un sol assez comparable (Chopart, 1980). Ces vitesses varient selon les niveaux d'humidité du sol de 0,5 à 3,5 cm j⁻¹ du semis à la floraison. Les coefficients culturaux sont donnés dans la littérature (Dancette, 1973).

1.6 Traitements

Les parcelles paysannes retenues ont reçu ou non une fertilisation minérale conseillée par les Services de la Vulgarisation de l'ordre de 100 kg ha⁻¹ de N-P-K- et de 50 kg ha⁻¹ d'urée apportée en deux fois.

1.7 Codage des variables pour l'analyse en composantes principales

1.7.1 Variables morphopédologiques

Les Unités géomorphologiques

Glacis de raccordement entre glacis ancien supérieur et récent cuirassés :	1
Glacis récent inférieur cuirassé :	2
Glacis subactuel non cuirassé :	3
Glacis versant entaillant le précédent :	4
Terrasse colluvio-alluviale :	5

Types de sols.

Sols peu évolués:	1
Sols ferrugineux tronqués:	2
Sols ferrugineux peu lessivés :	3
Sols ferrugineux beiges/rouges à taches:	4

<i>Forme du relief</i> : FORM	- Convexe :	1
	- Convexe et plan :	2
	- Plan :	3
	- Convexe et concave :	4
	- Concave :	5

Dégradation superficielle : L'intensité de la dégradation du milieu (Valentin, 1990) a été regroupée en quatre classes :

Milieu faiblement dégradé	C1:	1
Milieu moyennement dégradé	C2:	2
Milieu fortement dégradé	C2-3 :	3
Milieu très fortement dégradé	C3:	4

Pente (%) : PENT

La déclivité est exprimée en %.

Profondeur de la cuirasse : CUIR.

La profondeur d'apparition de la cuirasse est exprimée en cm.

1.7.2 Variables de flux

Flux hydriques simulés (mm) :

- Ruissellement : RUOF.
- Report hydrique : RUON.
- Drainage : DRAI.
- Stocks hydriques : STOC.
- Evapotranspiration réelle : sans report hydrique : ETR0
avec report hydrique : ETRR.

1.7.3 Variable hydro-pédologique

Réserve en eau utile racinaire mesurée (mm) RUR.

La réserve en eau utile racinaire est le concept intégrateur des paramètres sol (réserve en eau utile) et plante (enracinement maximum). C'est donc un paramètre de fonctionnement et non d'état. Cette eau utile est limitée par la profondeur du front d'humectation et elle est quasiment atteinte, sans limitation hydrique, vers 50 à 60 jours après semis.

1.7.4 Sites

Sénégal : Thyssé : nd, T, K, do (topo 1), di (topo 2).

Mali : ka

Niger : Ze1 (topo 1) et Ze2 (topo 2), ZeDr et ZeDj entre les deux topos, A89 et A90, To, Ko, Ty.

II RESULTATS ET DISCUSSION

2.1 Identification et hiérarchisation des variables pertinentes

Le caractère multivarié des sols est bien connu concernant leurs principales propriétés morphologiques et physiques (Moutonnet et al., 1988; Valet, 1995). Pour arriver au tri des variables les plus importantes pour décrire la variabilité du fonctionnement et du comportement hydrique des sols, et au classement des parcelles, il est nécessaire de procéder préalablement à l'établissement de la matrice des corrélations. Certaines corrélations se dégagent entre variables d'un même groupe ou entre groupes. D'autres s'esquissent seulement, mais cela est normal car toutes les parcelles ont été conservées, celles attaquées par la maladie comme celles saccagées par des animaux.

La distribution des variables est normale pour la RUR et des stocks, log-normale pour toutes les autres variables (Tableau 3).

Tableau 3 : Analyse de la distribution des variables.

Variables	Mini	Maxi	Moy	CV%	Q25%	Q50%	Distrib
Déclivité %	0,01	6	1,5	83,2	0,6	0,9	LN
Prof. cuirasse cm	30	400	170,6	33,6	100	120	LN
RUR mm	30	200	102,6	31,0	80	100	N
Runoff mm	0	269	36,4	110,8	0	24	LN
Runon mm	0	125	31,4	138,7	0	0	LN
Stock hydrique	0	101	38,2	63,9	14	38	N
Drainage mm	0	165	29,4	141,5	0	5	LN
ETR+runon mm	126	413	227,6	25,28	188	211	LN
Satisfaction %	22	96	52,5	31,4	39	48	LN
ISAT	3,2	86,1	33,0	59,7	15,9	25,6	LN
Rdt grain kg ha ⁻¹	0	2011	483,4	89,0	36,6	170	LN

Nota : N : courbe de Gauss ; LN : log-normal.

2.2 Résultats de l'AFC

L'AFC conduite avec toutes les variables montrent que :

- la qualité d'explication de l'inertie totale est très forte pour le report hydrique, le drainage, qui lui est corrélé, et le rendement du mil (QLT>940), fort pour l'ETR (QLT=750) et moyen pour l'encroûtement, la profondeur de la cuirasse, les types pédologiques et la géomorphologie, deux caractéristiques fortement liées (QLT de 489 à 601) ;

- les trois premiers axes expliquent 77,2% de la variance du nuage des sites; l'axe 1 explique seulement 47,3 %. Mais 59 parcelles sur 125 sont mal classées (QLT<750) .

La projection des variables sur le plan 1 (axes 1 et 2) montre que les axes séparent des groupes où s'associent des variables d'état et de fonctionnement (Figure 2). La déclivité, la forme du

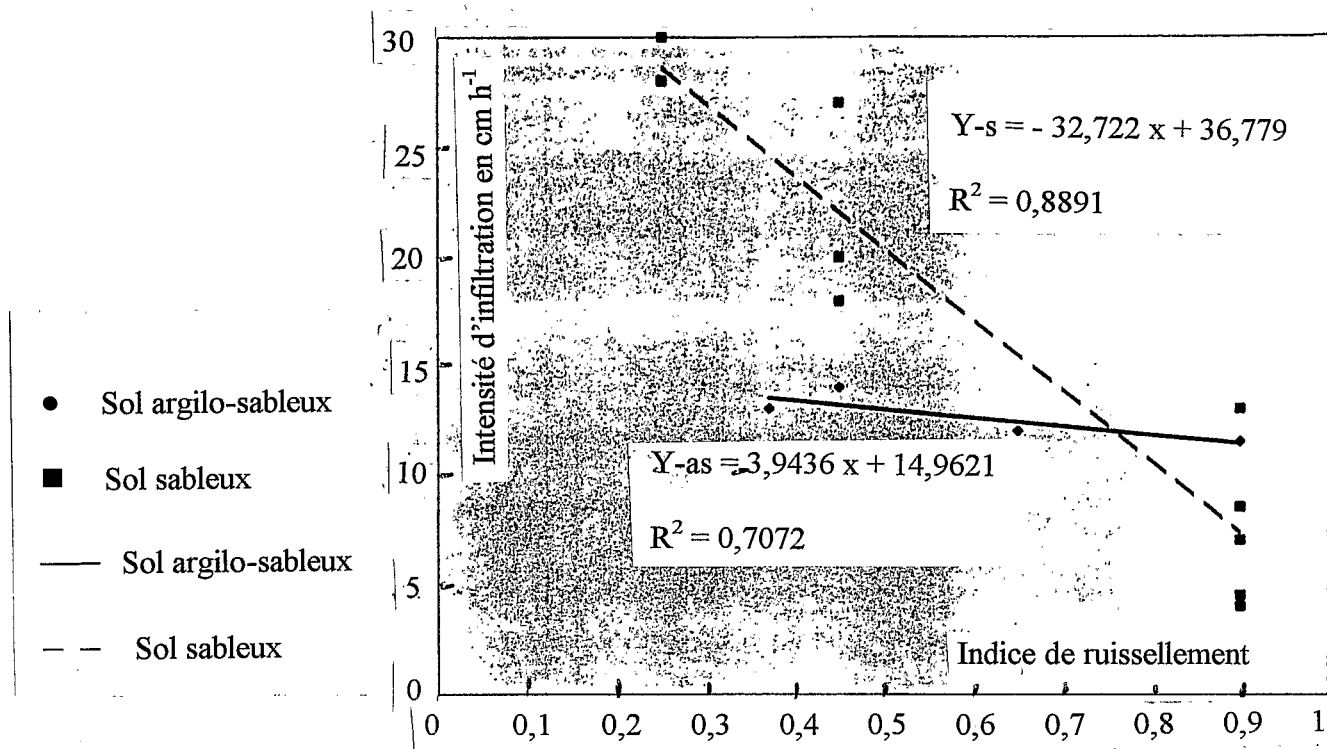


Figure 3 - Relation entre l'intensité d'infiltration stabilisée et l'indice de ruissellement lié au type de croûte à Torodi et Kouré.

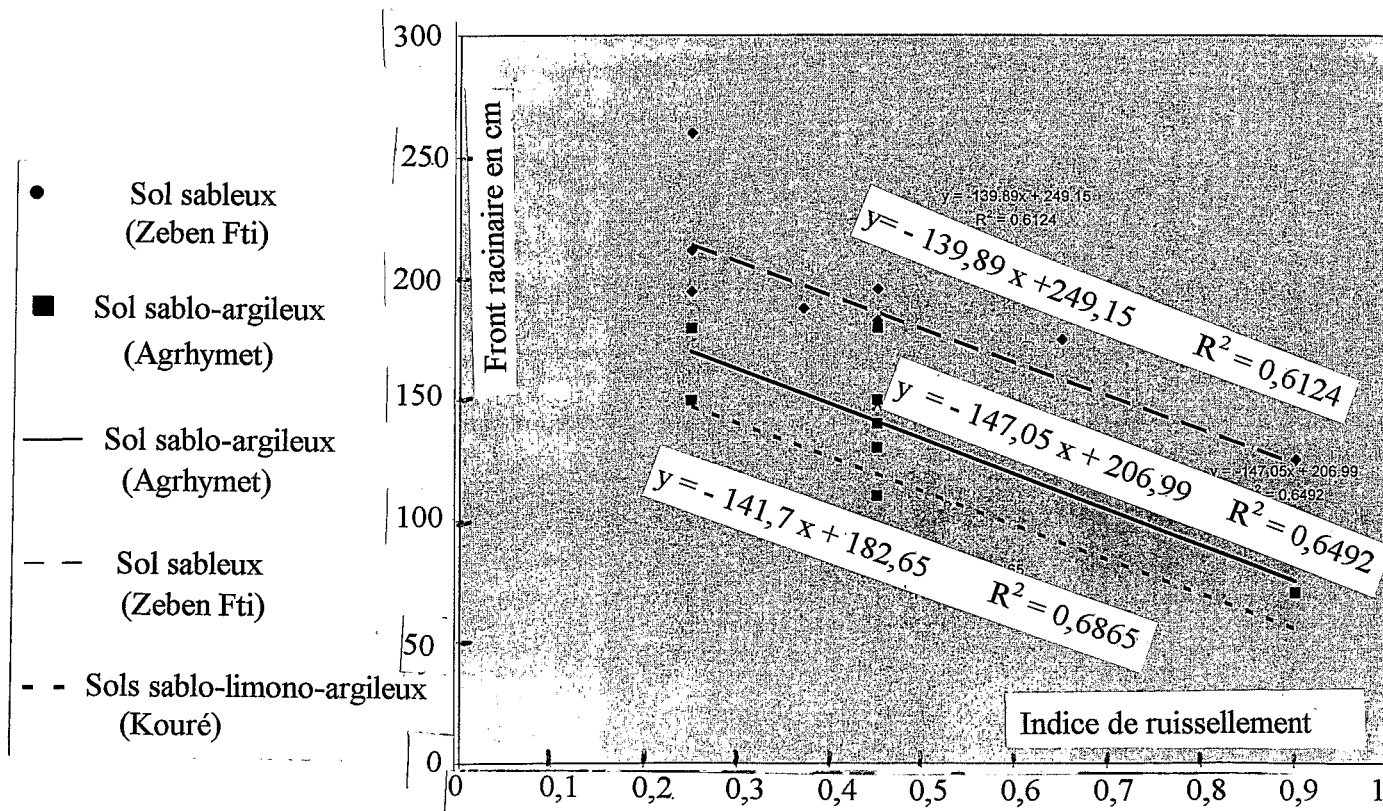


Figure 4 - Relation entre la profondeur du front d'enracinement et l'indice de ruissellement lié au type de croûte à Zeben Fiti et Kouré.

modèle n'intervient pas sur les flux, contrairement aux résultats de nombreux chercheurs (Freebairn et al., 1991; Hanna et al., 1983). La fertilisation ne joue aucun rôle.

Par contre, on constate :

- 1- le rôle significatif du type d'encroûtement sur la redistribution des flux superficiels comme l'ont démontré Casenave et Valentin (1989),

En effet, les pluies développent une énergie cinétique élevée qui est à l'origine de la déstructuration des agrégats des sols sahéliens, particulièrement fragiles, expliquant la création des croûtes, quels que soient le couvert végétal et la texture (McIntyre, 1958; Smith et al., 1990; Sharma et al., 1990; Hoogmoed et Stroosnijder, 1984; Valentin, 1990; Owonubi et al., 1991). Il existe une relation entre la baisse de l'intensité d'infiltration stabilisée et l'importance de l'organisation pelliculaire, caractérisée par l'indice de ruissellement emprunté aux lames ruisselées, mesurées à Torodi et Kouré (Figure 3).

- 2- la dépendance entre la RUR et le report hydrique à l'exception des sols très minces,

L'évolution parallèle des flux hydriques et des stocks potentiels sont à l'origine de l'amélioration de la consommation en eau du mil. La RUR, en dehors des sols minces, est influencée par la profondeur d'enracinement, elle-même fortement dépendante du type de croûtes à Zeben Fiti, Agrhymet et Kouré (Figure 4). Ces dernières, quelles que soient la texture et la pluviométrie, ont une action voisine sur la dynamique racinaire. Ceci, établi sur un faible nombre de mesures (29), reste à être approfondi.

- 3- une corrélation et une évolution semblable du report hydrique et du drainage,

Comme le drainage se produit après le remplissage de la réserve en eau du sol, il ne peut donc être assimilé sur la parcelle à une perte en eau pour la plante contrairement aux idées encore admises par Hanna et al. (1983), Payne et al. (1990), Pérez (1994) et Ouattara et al. (1994). Par contre, il représente réellement une perte d'alimentation hydrique pour les parcelles aval car sa baisse est corrélative à la hausse du ruissellement et du report hydrique comme cela a été démontré également par simulation (Sharma et Luxemore, 1979) et donc à un accroissement de l'éventail du report hydrique (Valet, 1996).

- 4- le report hydrique et l'ETR varient dans le même sens,

Ils expliquent la variabilité du rendement du mil.

- 5- le ruissellement s'oppose à ces flux et au rendement.

Les pertes ou les gains hydriques expliquent, pour une très grande part, la variance des rendements mesurés dans les champs paysans comme dans les essais agronomiques qui résulte soit de la péjoration, soit de la maximisation des réponses pédologiques, comme cela a été démontré sur le versant (Valet, 1996).

Ceci est bien confirmé par une deuxième AFC en ne conservant qu'une variable caractéristique des groupes qui présentent une bonne qualité de représentation ($R^2 > 600$). Les trois premiers axes atteignent 91,7% d'explication de la variance des parcelles, et seules 20 parcelles ne sont pas classées. L'axe 1 apparaît comme celui de l'encroûtement, du ruissellement et de la consommation en eau liés au rendement. Le drainage est corrélé aux 2ème axe et le report hydrique au 3ème (Figure 5).

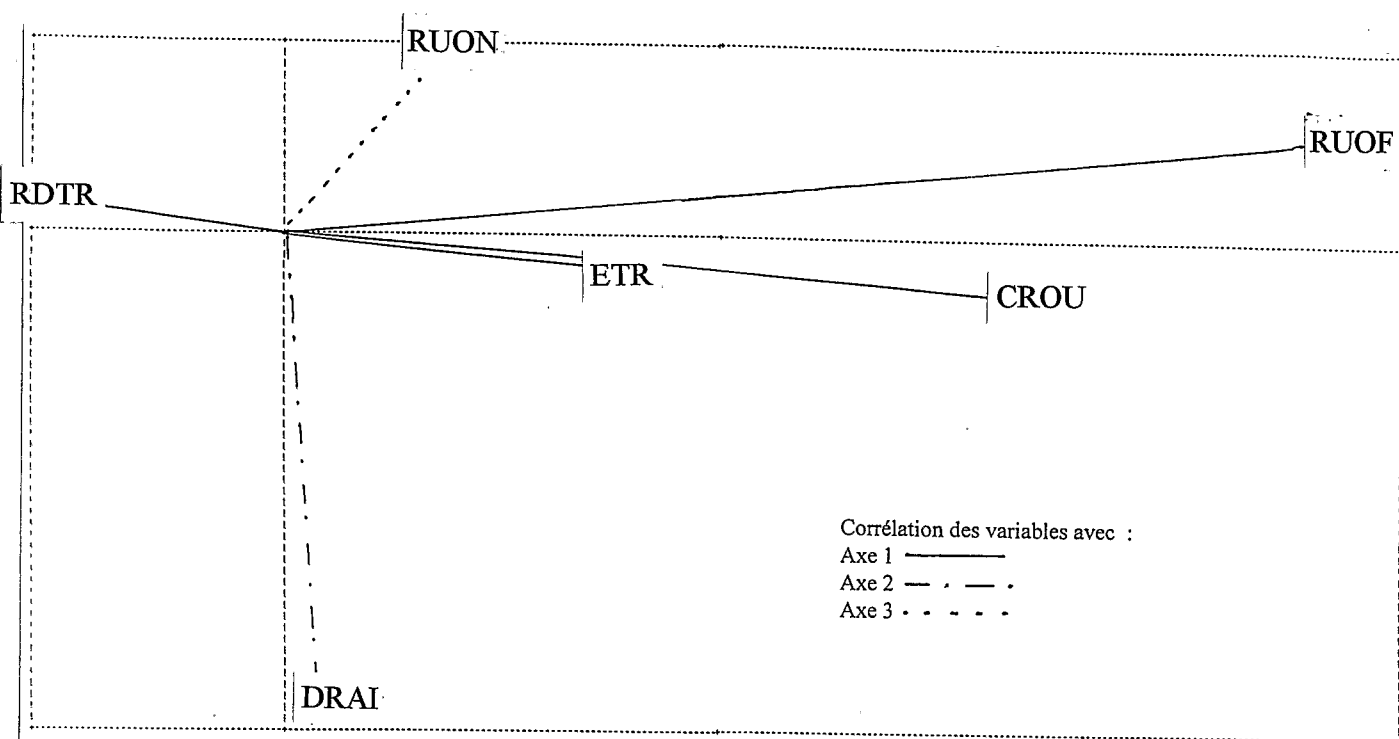


Figure 5 - AFC, représentation des 6 variables pertinentes dans le plan 1 (axe 1 horizontal et axe 2 vertical).

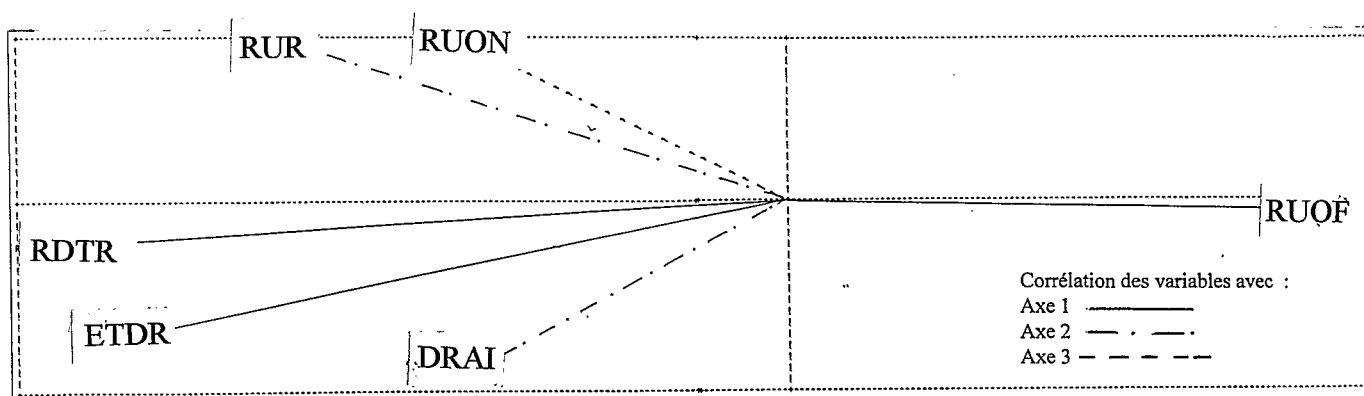


Figure 6 - ACP, représentation des 6 variables actives dans le plan 1 (axe 1 horizontal, axe 2 vertical)

2.3 Résultats de l'ACP

Une ACP sur les variables quantitatives pertinentes souligne le rôle majeure du report hydrique comme la variable la plus pertinente de classement des parcelles. En effet, la qualité de représentation de cette variable atteint 960. Les 3 premiers axes expliquent 76,4% de l'inertie totale de la variance des parcelles

La projection de ces variables sur le plan 1 qui explique 61,3 % de la variance du nuage des parcelles montre sur l'axe 1 l'opposition entre le ruissellement et les autres flux qui expliquent la variabilité du rendement (Figure 6). La réserve en eau utile racinaire est voisine du report hydrique qui la modifie à la hausse et s'oppose sur l'axe 2 au ruissellement comme au drainage qui en limite le remplissage. L'ETR est proche du rendement du mil, toutes variétés confondues avec et sans fertilisation.

Le tri hiérarchique conduit à constituer 12 groupes de ces 125 parcelles dont seuls les extrêmes se distinguent car les valeurs des variables croissent selon un gradient sur les axes.

La projection des parcelles sur le plan 1 (axes 1 et 2) démontre bien :

- aucun regroupement selon la variété de mil, le pays et la fertilisation ;
- un accroissement parallèle du report hydrique et de l'ETR;
- une nette augmentation du rendement avec celle de l'ETR;
- un effet synergique de la fertilisation pour des reports hydriques supérieurs à 120 mm, par ex. kmr et Ze23 avec fertilisation et do70 et NoD3 sans fertilisation. En dessous, la réponse au report hydrique est identique avec et sans engrais. Elle peut résulter du dépôt d'éléments fertilisants par le report hydrique; en effet, à Thyssé on a mesuré, en surface (0-20 cm), des augmentations de 122% en cations échangeables, de 70% en carbone organique, de 33% en P₂O₅ et une variation du pH de 6,7 à 7,3 dans les parcelles soumises à des reports hydriques par rapport à des parcelles protégées de tout apport. Ces gains sont donc comparables aux pertes en carbone organique et en éléments fins provoquées par le ruissellement mesurés par ailleurs par Lowrance et Williams (1988) et ce, quelle que soit la texture (Koro et al., 1995). Ces apports et ce redressement du pH sont à rapprocher également des apports dus au vent de sables chargés en éléments fertilisants, comme l'ont démontré Modi et al. (1995) (Figure 7). Lal (1986, 1995) signale que cet apport d'éléments fins et de carbone peut en surface augmenter la rétention hydrique.

Sur les mêmes toposéquences, en absence de report, l'alimentation en eau est insuffisante et l'effet de la fertilisation est nul.

2.4 Conséquence sur le rendement

La variabilité des rendements des zones étudiées est élevée sur les versants comme à la parcelle (Tableau 6).

Tableau 6 : Rendement moyen du mil en grains (kg ha⁻¹) de parcelles paysannes en fonction de la position sur la toposéquence (20 parcelles environ par position topographique sauf pour les pseudo-dolines).

LIEUX	Thyssé, Sénégal		Kassela, Mali		Torodi, Niger		Zeben Fiti	
	1984		1988		1990		1990	
MIL	90 j		90 j		120 j		120j	
Fertilisation	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Pseudo-doline*	1500	2350						
Haut	511	-	234		1240	1908	580	1227
Mi-pente	601	-	943	1318		2380	315	940
Bas	783	1334					382	1080
Replat	1300	1600	610		1870	2689	362	960
Terrasse	1960	2410	1010	2011				

* pseudo-doline : dépression à sol profond formant réceptacle pour les reports hydriques située sur le plateau cuirassé à sol superficiel.

Pour beaucoup de chercheurs, cette variabilité est liée à celles des terroirs ou à des modifications de leur fertilité chimique (van Staveren et Stoop, 1985; Poss et al., 1990; Manu et al., 1990). D'autres chercheurs l'ont attribué à la position sur le versant qui privilégie, de part leur différence texturale et de profondeur, les stocks hydriques (Lal, 1975; Hanna et al., 1983). Or, le rôle du report hydrique qui apparaît dominant dans le classement des parcelles explique bien mieux cette variabilité. En effet, à Thyssé, en conditions bioclimatiques uniformes sur un même versant, pour 23 parcelles sur lesquelles les flux ont été soigneusement identifiés, une forte corrélation a été obtenues entre L'ETR et le report hydrique ($R^2= 0,809$). C'est pourquoi les corrélations entre le rendement et la consommation en eau est bien supérieure avec la prise en compte du report hydrique (Tableau 7). Les coefficients de détermination doublent quand on retient le report hydrique comme variable explicative.

Tableau 7 : Amélioration des coefficients de détermination de la relation entre le rendement du mil (kg ha⁻¹) et l'ETR (mm) par la prise en compte du report hydrique.

Report hydrique	Variétés Fertilisation	Mil de 90 jours		Mil de 120 jours	
		Non	Oui	Non	Oui
Sans	R ²	32,9	29,0	31,7	30,8
Avec	R ²	69,8	60,7	73,4	64,9

Une amélioration de la prédiction de ces équations est possible avec la prise en compte des autres flux, quand ils ne sont pas corrélés à l'ETR. Cette incorporation des flux dans l'équation permet ainsi une très bonne prédiction du rendement du mil (Tableau 8).

Tableau 8 : Coefficients de détermination partiels et cumulés entre le rendement et les flux hydriques selon les variétés et la fertilisation, après élimination des parcelles endommagées par maladie et attaques.

	Variétés Fertilisation	Mil de 90 j		Mil de 120 j	
		Non	Oui	Non	Oui
Variables explicatives	ETR	69,80 (+)	60,97	73,4 (+)	64,92 (+)
	Report hydr.	5,46 (+)	(0,87)	5,55 (+)	-
	Drainage	-	-	6,24 (+)	7,29 (+)
	Ruissellement	3,12 (-)	3,26	-	-
	Cste	-601,0	-811,9	247,86	697,2
	R²	78,39	65,1	85,19	72,26
	F	61,65	14,92	28,76	6,5
	σ résiduel	151,5	314,1	63,52	120,7
Rendement	Moyenne	330,5	699,1	429,16	1346,4
	σ	316,75	501,3	150,66	193,7
Nombre de parcelles		55	28	19	8

σ : écart-type. F : Snedecor. (+) et (-) corrélation positive et négative des variables.

Ces résultats prouvent que la redistribution du ruissellement, à différentes échelles, est principalement la cause de la baisse et de l'hétérogénéité des rendements cultureux par suite de la baisse de la fertilité liée à l'érosion (Aubert, 1942; Frye et al., 1983; Valet, 1985 a ; Langdale et al., 1979; Hairstone et al., 1988) et aussi par la diminution des stocks hydriques du sol (Onofiok et Singer, 1984; Valet, 1985 c; Smith et al., 1990). Par contre, le report hydrique joue un rôle tout à fait antagoniste et positif par l'amélioration de l'offre hydrique et par l'apport d'éléments fertilisants. Malgré la taille des parcelles et des caractéristiques spécifiques des croûtes, à Thyssé, au même niveau de dégradation, elles contiennent beaucoup moins de porosité vésiculaire qu'au Niger Son action demeure primordiale et domine celui du micromodèle reconnu comme à l'origine de la variabilité de l'encroûtement sur de faibles distances. Ainsi, le ruissellement en nappe observé, même sur faible pente en de nombreuses zones climatiques, a pu être expliqué sur des sols apparemment perméable (Fédoroff et Courty, 1990; Flicroft et al., 1991; Van Es, 1991; Kachanoski et al., 1985; Valentin, 1990). Cette offre hydrique supplémentaire joue bien le rôle d'une irrigation complémentaire à la pluie.

Les relations entre les rendements simulés et les rendements mesurés au champ sont bonnes (Tableau 9). Cette validation autorise donc leur utilisation pour prédire le rendement sur les versants en zone soudano-sahélienne en tenant compte du report hydrique.

Tableau 9 : Validation des équations prédictives du rendement des mils de 90 et 120 jours, avec et sans fertilisation, sur les toposéquences en zone soudano-sahélienne.

Variété	Fertilisation	Pente	R ²	F	σ_r	Moy.	σ
90 j	Non	1,00	89,8	472,9	147,2	330,5	147,3
	Oui	0,88	88,4	204,6	277,8	697,3	404,0
120 j	Non	0,93	98,5	1144,4	57,48	428,8	138,9
	Oui	0,99	99,5	1453,1	100,2	134,5	165,3

σ_r : écart-type résiduel; σ : écart-type du rendement simulé.

Les modifications dans la morphogenèse, liée au ruissellement, et dans la pédogenèse, due au report hydrique, s'exercent contradictoirement sur des espaces restreints qui peuvent être de quelques mètres. Elles peuvent donc être mises en valeur par le triage granulométrique, les différences des teneurs en matière organique et en cations. Une étude de leur variabilité géospatiale traduirait celle des flux hydriques superficiels qui sont la cause de cette distribution hétérogène. Cette variabilité inter et intra-unité morphopédologique suggère l'existence d'une structure spatiale des flux de surface, démontrée par de nombreux chercheurs pour différentes propriétés physiques et hydriques des sols (Gajem et al., 1981; Sisson, 1981; Greminger et al., 1985; Van Es et al., 1991; Pérez, 1994; Valet, 1995). Il faut souligner que, pour une gestion économique et technique rationnelle, la connaissance de la structuration spatiale du paysage est intéressante pour faire réfléchir sur les fonctionnements hydrique et géochimique, ainsi que sur la morphopédogenèse.

En effet, le signal pédologique, lithologique et textural est souvent brouillé par les flux de surface et ne supporte pas la confrontation avec ce fonctionnement des hydrosystèmes.

Contrairement à Bock (1994), qui affirme que la saine gestion de l'espace ou d'une parcelle ne peut se concevoir que sur la base d'une bonne connaissance des sols et de leurs propriétés, ces résultats démontrent, qu'en zone soudano-sahélienne, c'est la connaissance du fonctionnement hydrique des écosystèmes qui est déterminante. Ainsi, cette étude montre qu'il faut moins rechercher dans les propriétés intrinsèques des sols et de leur potentialités que dans leur fonctionnement hydrique à tous les niveaux de perception ce que les pédologues sont en effet loin de pouvoir prétendre fournir comme réponse pour une gestion et utilisation rationnelle du sol.

Cependant, cette classification correspond au comportement et au fonctionnement hydriques d'une année particulièrement déficitaire au sein de la période sèche apparue depuis 1968. Il n'est pas absolument assuré que la constance de la pertinence de ces variables, caractérisant le fonctionnement hydrique, se retrouve en cas de récurrence pluvieuse. D'autres variables, liées au sol, cette fois-ci, à la plante et surtout au niveau d'intensification, pourraient vraisemblablement émerger.

L'importance du report hydrique, dans l'amélioration de l'alimentation en eau des plantes, montre l'obligation de conserver le ruissellement sur le versant. Mais sa conservation doit s'accompagner d'une forte réduction de sa compétence érosive pour limiter tout risque d'érosion en nappe et en ravine.

L'identification et la hiérarchisation des critères discriminants du fonctionnement hydrique permet une réflexion sur une méthodologie nouvelle pour comprendre l'organisation du paysage et, surtout, la sensibilité des cultures aux flux hydriques et minéraux superficiels. Elle doit être à l'origine d'une nouvelle approche du contrôle du ruissellement mais surtout de la gestion et valorisation du report hydrique et du drainage.

CONCLUSION.

Cette étude sur 8 toposéquences, espacées spatialement et temporellement, a démontré qu'en zone soudano-sahélienne le fonctionnement hydrique des écosystèmes est le facteur primordial pour en assurer une typologie reposant sur un nombre minimum de critères pertinents écologiques. Car les classifications taxonomiques apparaissent impropres à exprimer les caractères fonctionnels qui sont apparus prioritaires pour le classement des sites.

Parmi les facteurs explicatifs de l'alimentation hydrique des plantes, le report hydrique est le principal. Ce dernier, composante bénéfique du ruissellement, correspond bien à une "irrigation naturelle, complémentaire et simultanée à la pluie qui l'a générée, en fonction des états évolutifs de surface". En effet, malgré l'hétérogénéité des parcelles, la variabilité du report hydrique sur les différentes toposéquences est en accord avec le rôle de l'organisation pelliculaire superficielle ou nature de l'encroûtement. C'est le report hydrique qui explique le mieux, grâce à l'amélioration de l'alimentation en eau des plantes, la variabilité des rendements sur les versants. La fertilisation a un effet synergique avec le report quand ce dernier est important, sinon elle reste sans effet aux faibles satisfactions hydriques.

Ainsi, les effets de l'utilisation des écosystèmes requièrent la connaissance détaillée des processus gouvernant la genèse et le maintien du report hydrique. Déchiffrer le fonctionnement hydrique superficiel ne peut reposer sur le signal pédologique, lithologique et textural car il est souvent brouillé par les flux superficiels et il ne supporte pas la confrontation avec les états de surface qui prédominent et génèrent les flux superficiels.

La connaissance du report hydrique offre aux agronomes et forestiers une possibilité de réduire les risques de sécheresse et de valoriser localement les intrants. Elle permet surtout de repenser l'intensification agricole qui a fait faillite.

Sur le plan de la mise en valeur agricole, pour arrêter l'effondrement de proche en proche des écosystèmes, ces résultats sur le fonctionnement hydrique des paysages permettent de proposer des orientations originales. Il devient urgent d'envisager l'implantation, par les paysans, d'un "bocage soudano-sahélien" constitué de barrages filtrants biologiques et physiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., P. PEREZ et M. VAKSMAN, 1991. Amélioration des modèles de bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. *Soil water balance in the Sudan-Sahelian Zone (Proceed. of the Niamey Workshop, Niger). Febru. 1991. IHAS Pub. (199): 483-495.*
- AMBOUTA, 1994. Etude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin au Sahel. *Univ. de Laval, Quebec, 97p.*
- ANDRIESSE W. and L.O. FRESCO, 1991. A characterization of rice growing environments in west africa. *Agric. Ecosyst and Environ. 33 : 337-395.*
- ANGE A., 1984. Stratification des paysages agraires pour l'identification des contraintes à la production agricole. La mise au point de solutions techniques. *Actes de l'atelier la Recherche agronomique pour le milieu paysan. Ncaning, 5-11 mai 1985, Sénégal : 40-50.*
- AUBERT G., 1942. Travaux récents sur les sols africains. *Revue de Botan. Appliq et d'Agron. Trop. Museum Nat. d'Hist. Natur. Labo. d'Agro. Trop. Paris, France. 22è année, 254-255-256 : 495-500.*
- BERTRAND R., 1972. Morphopédologie et orientations culturelles des régions soudaniennes du Sine Saloum (Sénégal). 1 carte au 1/100 000. *Agron. Trop., 11 : 1113-1190.*
- BOCK J., 1994. Analyse de sols et gestion de l'espace. Plaidoyer pour le cadrage géomorphopédologique dans les projets, expertises et services de conseils. *Etude et Gestion des sols 1:23-33.*
- BRUBAKER S. C., A.J. JONES, K. FRANCK and D.T. LEWIS, 1994. Regression models for estimating soil properties by landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.. 58 : 1763-1767.*
- CASENAVE A., 1982. Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., XIX, 4 : 207-227.*
- CASENAVE A. et C. VALENTIN, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Edit. ORSTOM, Coll. Didactiques. France. 226p.*
- CASENAVE A. et C. VALENTIN, 1991. Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne. *Soil water balance in the sudano-sahelian zone (Proceeding of the Niamey workshop, February 1991). IAHS Publ. (199): 99-108.*
- CHOPART J.L., 1980. Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, Sorgho, riz pluvial). *Doctoral thesis. Inst. Nation. Polytechn. Toulouse. France. 160 p.*
- CHOPART J.L. and M. VAUCLIN, 1990. Water balance estimation model : field test and sensitivity analysis. *Soil sci. Soc. Am. J. 54 : 1377-1384.*
- DACOSTA H., 1992. Economie de l'eau et DRS sur les bassins versants de Thyssé-Kaymor. Synthèse hydrologique 1983-1988. *ORSTOM Dakar. 67 p.*
- DANCETTE C., 1973. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agro. Trop. 38 : 281-292.*

- DAOUDA S., M. SICOT et P. MARINI, 1991. Caractérisation de la diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical, différencié sur sable dunaire en milieu soudano-sahélien. *Soil Water Balance in the sudano-sahelian zone (Proceeding of the Niamey workshop, February 1991) I.A.H.S. Publ. 199* : 209-216.
- DELHOUME J.P., 1990. Contribution à l'étude des relations eau-sol-végétation en zone aride du nord de Mexique. ORSTOM-CONACYT. Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. *Vachaud edit. IMG. Grenoble* : 197-209.
- DIOP M., 1996. A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sci. et Changement*.
- EAGLEMAN W., 1976. An experimental model for actual evapotranspiration. *Agri. Meteorol. (4-5)* : 385-394.
- EVETT R.S. et G. DUTT, 1985. Length and slope effects on run-off from sodium dispersed, compacted earth microcatchments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49 : 734-738.
- FEDOROF et COURTY, 1990. Indicateurs pédologiques d'aridification : exemple au Sahara. *Bull. Soc. Geol. France. Tome V, n° 1*, pp:43-53.
- FLICROFT J.D., G. DUGDALE and J-R. MILFORD, 1991. Spatial aspect of the seasonal soil water budget in a semi-arid grassland. *Soil water balance in the sudano-sahelian zone (Proceeding of the Niamey Workshop, Feb. 1991). IAHS Publ. 199* : 363-373.
- FREEBAIRN D. M., S.C. GUPTA and W.J. RAWLS, 1991. Influence of aggregate size and microrelief on development of surface soil crusts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 188-195.
- FRETEAUD J.P., R. POSS and H. SARAGONI, 1987. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. *Agro. Trop. 2* : 94-101.
- FRYE W. W., S.A ELBHELAC, L.W MURDOCH. and R.L BLEVINS, 1982. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 : 1051-1055.
- GAJEM Y.M., A.W. WARRICK and D.E. MYERS, 1981. Spatial dependence of physical properties of a typical torrifluent soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 709-715.
- GAVAUD M., 1977. Les grands traits de la pédogenèse au NIGER méridional. *ORSTOM, Paris, France. Coll. Trav. et Docu.*, (76) : 102p.
- GERRARD A.J., 1981. Soils and landform. *George Allen Univ. Publisher*. 152p.
- GREMINGER P-J., Y.K. SUD and D. R. NIELSEN, 1985. Spatial variability of field-measured soil-water characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 1075-1082.
- HANNA A.Y., P.W. HARLAN and D. T. LEWIS, 1983. Effects of landscape position and aspect on soil water recharge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 : 57-60.
- HOOGMOED W.B. and L. STROOSNIJDER, 1984. Crust formation on sandy soils in the Sahel I: rainfall and infiltration. *Soil and Tillage Research. 4* : 5-23.
- IRAT-SOPRA, 1989. BIPODE : Bilan hydrique à la parcelle pour la prévision et l'optimisation des doses en eau. *IRAT-SOPRA, version 2.0-01/89. Clamart, France*. 41 p.
- KACHANOSKI R.G., E. DE JONG and D.E. ROLSTON, 1985. Spatial and spectral relationships of soil properties and microtopography : I Density of thickness A horizon II : Density of B horizon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 804-820.

- KORO N., C. BERNARD et M. R. LAVERDIERE, 1995. Contrôle du ruissellement, de l'érosion et des pertes de phosphore par les résidus de culture, sous pluie simulée. *Etude et gestion des Sols*, 2,3 :173-182.
- HAIRSTONE J.E., J. O. STANFORD, F. E. RHOTON and M. MILLER, 1983. Effect of soil depth and erosion on yield in the Mississippi black-lands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1458-1463.
- LAL R., 1975. Role of mulching technics in tropical soil and water methods. *Techn. Bull. IITA. Ibadan 1* : 13p.
- LAL R., 1986. Erodibility and erosivity. In Lal R. (Ed) Soil erosion research methods. *Soil and Water conservation. Soc. Ankeny, Iowa*, 141-160.
- LAL R., 1995. Erosion-crop productivity relationships for soils of Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,59:661-667.
- LAMACHÈRE J.M. et G. SERPANTIÉ, 1989. Improvement of cultivated slopes in the sudano-sahelian areas, thanks to permeable microdam systems. Hydrological, agronomic and socio-economical aspects. An existing needs to improve setting-up and cropping; production conditions. *Comm. Project of the ISCO Confer.* 24p.
- LANGDALE G.W., J-E. BOX, R.A.LEONARD, A. P. BARNETT and W.G. FLEMING, 1979. Corn yield reduction on eroded southern Piedmont soils. *J. Soil Water Cons.* 34: 226-228.
- LOWRANCE R. and R.G. WILLIAMS, 1988. Carbon movement in runoff and erosion under rainfall conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1445-1448.
- MANU A., S. C. GEIGER, A. BERRADA and J.S. WENDT, 1990. Microvariabilité dans le Sahel : un aperçu général. *Prog. Trosoil. Projet RAAN-INRAN-NIGER. Chimie des sols et fertilisation* : 117-128.
- MARCESSE J., 1967. Détermination *in-situ* de la capacité de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons. *Colloq. sur l'emploi des rayonnements dans les études sur la physique du sol et l'irrigation. CEA. AIEA. ONU. Istanbul, Turquie.* 8p.
- MCINTYRE D.S., 1958. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Sci.* 85: 185-189.
- MODI A.I, J-P. LACAUX et J.G. BAUDET, 1995. Chimie des aérosols et des pluies dans la savane semi-aride du Niger pendant la saison humide 1989. *Sécheresse, Vol 6, n° 4* : 331-335
- MOUTONNET P., E. PLUYETTE, N. EL. MOURABIT and P. COUCHAT, 1988. Measuring the spatial variability of soil hydraulic conductivity using an automatic moisture gauge. *J. Soil Sci. Vol.* 52:1521-1526.
- ONOFIOK O. and M.J. SINGER, 1984. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 48: 1137-1143.
- OUATTARA B., M.P. SEDOGO, F. LOMPO et K. OUATTARA, 1994. Effets des techniques culturales sur l'alimentation hydrique du sorgho et le bilan minérale du sol dans le plateau central du Burkina Faso. *Bilan hydrique et sécheresse en Afrique tropicale. (Edit. John Libbey Eurotext). Paris, France* : 91-101.

- OWONUBI J. J., S. ABDULUDIN, W. B. MALGUI and S. MUAZIN, 1991. Review of soil water balance studies in the sudano-sahelian zone in Nigerian. *Soil water balance in the sudano-sahelian zone (proceeding of the Niamey workshop, Feb. 1991)*. pp329-338.
- PAYNE W.A, C.W. WENDT and R.J. LASCANO, 1990. Bare following on sandy fields of Niger, West Africa. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 54: 1079-1084.
- PEREZ P., 1994. Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du sud Saloum (Sénégal). *Thèse de Doctorat. ENSAM. Montpellier, France. 252p.*
- POSS R., H. SARAGONI, J.C. FARDEAU et P. QUANTIN, 1990. Influence de faibles quantités d'interstratifiés 2/1 sur la dynamique du potassium dans les sols ferrallitiques du Togo méridional. *Rencontres internationales 'Savanes d'Afrique, terres fertiles ?' Comment produire plus et de façon durable en zone de savanes au sud du Sahara.* Montpellier 10-14 déc. CIRAD ORSTOM, 1p.
- ROGNON P., 1991. Les sécheresses au Sahel replacées dans l'évolution des 20 dernières millénaires. *SECHERESSE. SEPT.91. n° 3 vol. 2:193-210.*
- ROOSE E., 1989. Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique occidentale. "Soil, crop, and water Management Systems for rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone : *proceedings of an International Workshop, 7-11 jan 1987. ICRISAT Sahelian Center, Niamey, Niger. Patancheru, AP 502324, India. : 55-72.*
- ROOSE E., 1990. L'érosion : un problème actuel de déséquilibre du milieu aménagé. La GCES. : une nouvelle stratégie pour résoudre ce problème de société. ORSTOM, Montpellier, France. 1p. Savanes d'Afrique, terres fertiles ?
- SERPANTIE G. et J.M. LAMACHERE, 1989. Aménagement des pentes cultivées soudano-sahéliennes grâce à des réseaux de microbarrages isohypses et filtrants. Nécessité d'une amélioration de leurs conditions de mise en oeuvre. *6 th International Soil Conservation Conference (ISCO), 6-18 nov 1989; Addis Abeba, Ethiopia.*
- SHARMA M., S.C. GUPTA and W.J. RAWLS, 1991. Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 301-311.
- SHARMA M.L. et R.J. LUXEMOORE, 1979. Soil spatial variability and its consequences on simulated water balance. *Water Res. Res.* 15, 6, : 1567-1572.
- SICOT S. et P. MARINI, 1991. Caractérisation de la diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical différencié sur sable dunaire en milieu sodano-sahélien. *Soil water balance in the sudano-sahelian zone. (Proceeding of the Niamey workshop). IAHS, n° 199 :209-216.*
- SISSON J.B. and P.J. WARIENGA, 1981. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 699-704.
- SMITH H.J.C., G.J. LEVY and R.J. SHAINBERG, 1990. Water-droplet energy and soil amendments : effect on infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 1084-1087.
- VALENTIN C., 1990. Les états de surface des bassins versants de Thyse-Kaymor (Sénégal). *ORSTOM Dakar, Sénégal. 10p.*

- VAN STAVEREN J. et VAN STOOP, 1985. Adaptation aux types de terroirs des toposéquences de l'Afrique de l'Ouest de différents géotypes de sorgho par rapport aux cultivars locaux de sorgho, de mil et de maïs. *Agro Trop.*, 41, 3-4 : 203-216.
- VALET S., 1984. Caractéristiques physiques, hydriques et hydrodynamiques des sols des 200 parcelles de l'essai coordonné au Sine Saloum, Sénégal (Campagne 1983). *ISRA-Département des Systèmes de Production et de transfert technologiques. BP 199, Kaolack, Sénégal.* 32p.
- VALET S., 1985 a. Action-test d'aménagement de la parcelle pour l'amélioration du bilan hydrique et de la lutte contre l'érosion (Essais en milieu paysan). *ISRA-CIRAD-IRAT.* 114 p.
- VALET S., 1985 b. Mesures du ruissellement et de l'érosion en milieu paysan au Sine Saloum (1983-1984). Programme Economie de l'eau - *Défense et restauration des sols. ISRA-IRAT/DEVE.* 132p.
- VALET S., 1985 c. Première approche du fonctionnement hydrique des paysages agraires au Sine Saloum. *IRAT-CIRAD-DEVE.* 32p.
- VALET S. et P.S. SARR., 1989. Première approche du fonctionnement hydrique de paysages agraires de savane. *Bull. n° 5, Réseau Erosion, ORSTOM, Montpellier, France.* 1 p.
- VALET S., M. SENE., P. PEREZ et P.S. SARR, 1993. Gestion agricole des reports d'eau sur le versant et à la parcelle à l'aide de barrages filtrants en zone soudano-sahélienne (Sénégal). *Bull. 13, Réseau Erosion; ORSTOM, Montpellier, France* : 143-157.
- VALET S., 1995. Approche statistique et prédiction du comportement et du fonctionnement hydriques des sols : application aux sols hétérogènes de la vallée du Niger., *Thèse de Doctorat de Pédologie. Université de Poitiers, 86022, Poitiers, France.*
- VALET S., 1996. Concept de gestion et de valorisation agro-forestière du report hydrique (runon) au Sahél : éco-développement alternatif. *ESRA96 : L'eau souterraine en région agricole. Poitiers 9-12 sept.1996.LHUP-Université de Poitiers et INRS-Eau-Université du Québec.* S2-81-84.
- VAN ES H.M., D.K. CASSE and R.B. DANIELS, 1991. Infiltrability and correlations with surface soil properties for an eroded Hapludulf. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 386-392.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Valet, S.; Sarr, P. S. - Le report hydrique comme principal critère de prédiction du rendement en zone soudano-sahélienne, pp. 174-195, Bulletin du RESEAU EROSION n° 18, 1998.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr