

Régime hydrique et sensibilité à l'érosion de systèmes écologiques de la zone aride (Tunisie)

Ch. FLORET (1), A. MTIMET (2) et R. PONTANIER (3)

(1) CEPE/CNRS Louis Emberger, route de Mende, BP 5051, 34033 Montpellier (France). (2) Direction des sols — Arrondissement de Gabès (Tunisie). (3) ORSTOM, 18, avenue Charles-Nicolle 1002 Tunis (Tunisie)

RÉSUMÉ

Les auteurs, sur la base de résultats, passent en revue un certain nombre de méthodes qu'ils ont utilisées. Celles-ci concernent essentiellement la caractérisation et l'évolution des régimes hydriques et de l'érodabilité des terres des zones arides, lorsqu'elles sont soumises à des perturbations anthropiques. Il est d'abord rappelé que ce type d'études se heurte à de fortes contraintes liées à une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, et à une grande diversité écologique des milieux.

Sont ensuite présentées, des méthodes de conduite en mode diachronique pluriannuel. On insiste sur les modes d'expression des résultats : efficacité des précipitations dans la recharge des réserves hydriques du sol, calendrier des disponibilités en eau, efficacité de l'eau pour la production végétale, érodabilité et sensibilité des terres à l'érosion hydrique.

Dans une deuxième partie est exposée une méthode d'étude en mode synchrone : la simulation de pluie. On insiste sur le fait que ce sont les états de surface du sol qui influencent l'infiltration ; les techniques d'évaluation de ceux-ci sont largement abordées et permettent l'utilisation d'indices de rugosité, d'occupation du sol, ainsi que de végétation. La présentation des résultats montre l'intérêt et l'originalité de la méthode.

En conclusion, sont abordés les problèmes de généralisation des résultats ou de transfert d'échelle, et il est montré la complémentarité des deux approches.

MOTS-CLÉS : Méthode — Sensibilité — Régime hydrique — Erodabilité — Pluie efficace — Efficacité de l'eau — Simulation de pluie — Transfert d'échelle — Zone aride.

ABSTRACT

WATER BALANCE AND EROSION SUSCEPTIBILITY OF ARID ZONE ECOSYSTEMS (TUNISIA)

The authors review, on the basis of results obtained, a certain number of methods which they themselves have used. These methods concern primarily the nature and evolution of the moisture regimes and the erodibility of the soils of arid regions when they are subjected to anthropic disturbances. It is pointed out, first, that in the ecological region concerned, this type of study is confronted with strong constraints related to great spatial and temporal variability in precipitations, and to a great ecological diversity of the environments in terms of susceptibility.

Next are presented methods of carrying out multi-annual diachronic studies. Emphasis is placed on the manner of expressing the results : efficiency of precipitation in replenishing the water reserves of the soil ; calendar of water availability ; rooting and water supply ; efficiency of water for plant production, erodability.

In a second part is presented a method of synchronous study : simulation of rainfall. It is stressed that it is the condition of the ground surface which influences infiltration. The techniques for evaluating this conditions are discussed at length ; they make it possible to define the indices of rugosity, of soil occupancy, and of vegetation. The presentation of the results reveals the value and the originality of this method.

In conclusion, the problems of extending these results and of making the transfer to other scales are discussed, the complementarity of the two approaches is demonstrated.

KEY WORDS : Method — Susceptibility — Moisture regime — Erodability — Water efficiency — Rainfall simulation — Transfer of scale.

RESUMEN

RÉGIMEN HÍDRICO Y SENSIBILIDAD A LA EROSIÓN DE LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS EN LA ZONA ÁRIDA (TUNEZ)

En base a los resultados, los autores examinan un cierto número de métodos utilizados por ellos mismos en Tunez y en Camerún Septentrional. Estos métodos se refieren esencialmente a la caracterización y a la evolución de los regímenes hídricos y de la « erodibilidad » de las tierras en las zonas aridas cuando están sometidas a perturbaciones antrópicas. En primer lugar, es necesario recordar que dentro de esa zona ecológica éste tipo de estudios se enfrenta a fuertes presiones ligadas a una gran variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, y a una gran diversidad ecológica de los medios en términos de sensibilidad.

Por otra parte, presentan los métodos de comportamiento en modo « diacrónico » plurianual en las estaciones y parcelas de las cuales se conoce bien el historial y sobre las que se puede mantener el sistema actual de explotación y/o introducir las perturbaciones antrópicas. Se insiste sobre las formas de expresión de los resultados : eficacia de las precipitaciones en la recarga de las reservas hídricas del suelo, calendario de las disponibilidades en agua, enraizamiento y estado hídrico, eficiencia del agua para la producción vegetal, « erodibilidad » y « erosividad » del milímetro de agua chorrada, etc.

En una segunda parte se expone un método de estudio en modo sincrónico : la simulación de lluvia. Se insiste sobre el hecho que son los estados de la superficie del suelo que influyen la infiltración ; las técnicas para evaluar estos factores están ampliamente tratadas y permiten evidenciar los indicios de rugosidad, de ocupación del suelo y también de la vegetación. La presentación de los resultados muestra el interés y la originalidad del método.

Como conclusión, se tratan los problemas de generalización de los resultados o de la transferencia de escala, asimismo se muestra la complementaridad de los dos enfoques.

PALABRAS CLAVES : Método y caracterización — Régimen hídrico — Erodibilidad — Precipitación eficaz — Eficiencia del agua — Simulación de precipitación — Transferencia de escala.

INTRODUCTION

L'accroissement de la pression démographique dans les zones arides situées au nord et au sud du Sahara entraîne depuis les dernières décennies des modifications profondes des modes de gestion et d'utilisation des ressources naturelles et de l'espace rural (FLORET *et al.*, 1981). Ces perturbations anthropiques induisent la raréfaction de la végétation naturelle, la dégradation des sols (érosion hydrique et éolienne), la détérioration du régime hydrique des terres, ainsi qu'une diminution de l'efficacité de l'eau pour la production végétale. Les décideurs et aménagistes sont donc confrontés à des situations qui évoluent rapidement, et qu'ils doivent être capables d'évaluer continuellement, et même de prévoir.

Les principales questions posées sont :

— Compte tenu des caractéristiques de la pluviosité (hauteur, intensité, durée), quelle est la quantité d'eau

perdue par ruissellement ou celle, restituée à la végétation en fonction du type, de l'état et de l'utilisation des systèmes écologiques ? En un mot, quelle est l'efficacité de la pluie à recharger les réserves hydriques du sol ?

— Quelles sont les conséquences prévisibles à court et à moyen terme sur le régime hydrique stationnel et/ou régional des perturbations anthropiques ?

— Compte tenu de cette recharge et de l'évapotranspiration potentielle locale, quel sera le calendrier prévisible des disponibilités en eau pour la végétation, au cours de l'année dans les différents systèmes écologiques ?

— Quelles sont les terres les plus sensibles à l'érosion hydrique et éolienne ? Comment réagissent-elles à ces différentes perturbations ?

Notre objet est de discuter ici un certain nombre de méthodes, utilisées principalement par nous-mêmes en Tunisie méridionale, ou dans la zone septentrionale du Cameroun, permettant de caractériser le régime

hydrique et l'érodabilité des terres des zones arides à différentes échelles d'espace et de temps.

Il faut rappeler tout d'abord que les études concernant le régime hydrique et l'érodabilité des terres se heurtent en zones arides à d'importantes contraintes liées à une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, et de l'état des unités du milieu.

Ainsi LE HOUEROU (1987) montre que le coefficient de variation de la pluviosité moyenne (écart-type/moyenne) augmente fortement depuis la zone à 600 mm (20 %) jusqu'à la zone 100 mm où il atteint 60 %.

BOURGES *et al.* (1984) montrent, sur un glaci s de la zone aride tunisienne étudié durant cinq années, qu'une seule pluie (12/12/73) a contribué pour 65 % au ruissellement total des cinq années et pour 44 % de l'éro-

sion. Concernant les précipitations, c'est surtout la variabilité du couple hauteur/intensité qui est la plus importante à prendre en considération.

Nous avons montré (BOURGES *et al.*, 1984) (tabl. I) que sur une même station, pour deux années à hauteur annuelle de précipitations à peu près identique, la quantité d'eau infiltrée dans le sol peut varier du simple au double, ceci étant essentiellement dû aux intensités et à l'état de la végétation annuelle et bisannuelle.

Suivant le type de milieu édaphique et son utilisation par l'homme, l'aridité d'origine climatique peut être, soit atténuée, soit au contraire accentuée en fonction de la redistribution, provoquée ou non, de l'eau des précipitations (FLORET et PONTANIER, 1984). Le sol joue donc un rôle d'autant plus déterminant que l'eau est rare.

TABLEAU I

Comparaison de l'infiltration des pluies annuelles sur une même station pour deux années à pluviosité voisine et intensités différentes, en Tunisie présaharienne (BOURGES *et al.*, 1984)

Comparison of annual rains infiltration on the same station during two years with closely related rainfalls and different intensity

	P totale (mm)	Pe (infiltrée) (mm)	Hauteurs des pluies précipitées à une intensité supérieure à 12 mm/h (mm)	Maximum du recouvrement de la végétation annuelle et bisannuelle (%)
1973-74	371	145	242	35
1975-76	356	304	31	100

Ces quelques remarques mettent en évidence les difficultés qu'il y a à caractériser les régimes hydriques et l'érodabilité des terres, en zone aride. A ceci, il faut ajouter que certaines études doivent parfois durer une décennie, voire plus, en raison de l'absence d'événements pluvieux suffisamment conséquents, soit pour obtenir l'événement pluviométrique qui permettra de bien caractériser le ruissellement et l'érosion, soit même pour pouvoir suivre une saison durant laquelle le milieu permet à la végétation d'exprimer pleinement ses potentialités.

Face à une telle situation, le spécialiste se voit obligé d'aborder les études de régime hydrique et d'érodabilité à différentes échelles d'espace et de temps.

Comment caractériser de façon fiable, en zone aride où la variabilité des précipitations est très importante, les régimes hydriques et l'érodabilité des terres ? Comment intégrer les variations saisonnières ou interannuelles de la surface du sol et de la végétation, ou encore saisir les changements des composants de l'écosystème liés aux perturbations anthropiques ? Le thématicien peut mener les deux démarches suivantes :

1. Conduite d'études en mode diachronique pluriannuel sur des parcelles et stations dont on connaît relativement bien l'historique en ce qui concerne l'utilisation et l'occupation des terres. Sur celles-ci on peut, soit maintenir le système de gestion actuel de l'espace, soit effectuer une action de mise en défens, ou encore introduire une perturbation anthropique (labour, éradication des ligneux, surpâturage, plantation, irrigation, etc.).
2. Conduite d'études en mode synchrone instantané. On n'a pas le temps ni les moyens d'attendre des précipitations aléatoires, aussi les reproduit-on suivant des protocoles déterminés par l'analyse statistique sur les hauteurs et les intensités des longues séries des postes pluviométriques. Ces simulations s'effectuent sur un grand nombre de situations naturelles ou provoquées (labour, etc.) et à des dates choisies. Cette méthode permet de caractériser les paramètres de l'infiltration et de l'érodabilité des terres de façon très rapide. Dans le cas où l'on s'intéresse uniquement au régime hydrique interne des sols en relation avec la phénologie et la production de la végétation, on se contente de simples arrosages ou

d'écrans pour limiter l'apport des précipitations (CCE, 1988).

Ce sont ces deux types de démarche que nous allons tenter d'illustrer successivement.

QUELQUES MÉTHODES D'ÉTUDE EN MODE DIACHROME DU RÉGIME HYDRIQUE ET DE L'ÉRODABILITÉ DES TERRES

Nous prendrons ici principalement comme exemple les résultats d'un projet de recherche et de développement intégré, réalisé en Tunisie aride durant une dizaine d'années et qui avait comme objectifs :

- l'identification de la nature et de l'état des ressources renouvelables : par exemple, inventaire et cartographie des ressources végétales et en sols, en relation avec les ressources animales, et les disponibilités en eaux ;
- la détermination des potentialités biologiques des divers milieux de l'espace considéré : mesure ou évaluation des productions actuelles et potentielles, détermination des usages possibles des sols et des végétations spontanées et cultivées ;
- la détermination des niveaux de sensibilité des différents milieux : études en termes de stabilité et de capacité de régénération, des seuils de dégradation, des réponses des milieux soumis aux impacts des activités humaines.

Pour atteindre ces objectifs, une approche écosystémique a été retenue à différents niveaux de perception de l'espace (régions, secteurs et systèmes écologiques), prenant en compte les aspects dynamiques (dégradation, régénération, érosion). Les résultats de ces recherches ont été largement publiés (FLORET *et al.*, 1981, 1982 ; FLORET et PONTANIER, 1982, 1984). On ne reprendra ici que les aspects concernant la dynamique de l'eau à l'interface sol-plante-atmosphère, ainsi que ceux liés à l'érodabilité des terres. Quelques résultats sont tirés aussi d'un programme de recherche réalisé au Nord-Cameroun (PONTANIER *et al.*, 1985 ; THEBE, 1987 ; CCE, 1988 ; THEBE et PONTANIER, 1989).

Les dispositifs expérimentaux

La figure 1 donne un exemple de dispositifs utilisés permettant la collecte de mesures en vue d'une étude intégrée en conditions météorologiques normales. Le but ici est de voir, en particulier sur une toposéquence, quelle est la part contributive au ruissellement de chacun des systèmes écologiques et l'évolution du régime hydrique sous une mise en défens. Ce genre de dispositif nécessite des études allant sur plusieurs années (5 à 10 ans) en fonction des caractéristiques de la pluviosité des années observées.

L'expression des résultats concernant le régime hydrique

Outre la caractérisation physico-hydrique des sols en termes de texture, porosité, conductivité hydraulique, courbes caractéristiques d'humidité (ou de succion), la description à l'état initial et au cours de l'expérimentation de la végétation..., on s'efforce avec ce type d'observations de trouver des modèles d'interprétation des résultats qui reflètent les différentes interactions entre les composants de l'écosystème.

Par exemple, on exprime le ruissellement ou l'infiltration en fonction du type de sol, du couvert végétal, de l'intensité et de la hauteur des pluies, ou bien on met en relation les réserves en eau du sol ou un certain régime hydrique avec la production végétale, etc.

Parmi ces résultats, certains sont essentiels pour caractériser l'aridité.

L'EFFICACITÉ DES PRÉCIPITATIONS DANS LA RECHARGE DES RÉSERVES HYDRIQUES DU SOL

Il s'agit simplement, en l'absence de drainage ou de remontées d'eau profonde, de la partie de l'eau de pluie qui s'est infiltrée dans le sol.

$$I = Pe = Pt \pm R$$

$$\text{avec } Ke = \frac{Pe}{Pt} \%$$

où I = infiltration en mm

Pe = pluie efficace (infiltrée) en mm

R = ruissellement en mm

Pt = pluie totale précipitée en mm

Ke = coefficient d'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en %

Pour apprécier cette efficacité, on quantifie soit le ruissellement dans une fosse, ou on utilise la méthode des profils hydriques. Dans ce cas, on mesure régulièrement les variations de réserve en eau totale du sol, en essayant d'encadrer le mieux possible les événements pluvieux.

Ce coefficient d'efficacité ou d'infiltration diminue avec la dégradation des systèmes écologiques. Son suivi permet d'apprécier l'aridification d'une région (FLORET et PONTANIER, 1984).

Sur la figure 2 est présentée, pour une toposéquence type, la variation spatiale établie sur cinq années de cette efficacité. On peut en déduire les conséquences pour la localisation optimale d'un éventuel aménagement (FLORET et PONTANIER, 1982).

LE RÉGIME HYDRIQUE DES SOLS.

LES DISPONIBILITÉS EN EAU POUR LA VÉGÉTATION

L'étude des régimes hydriques des sols permet d'expliquer en partie les adaptations et les comportements de

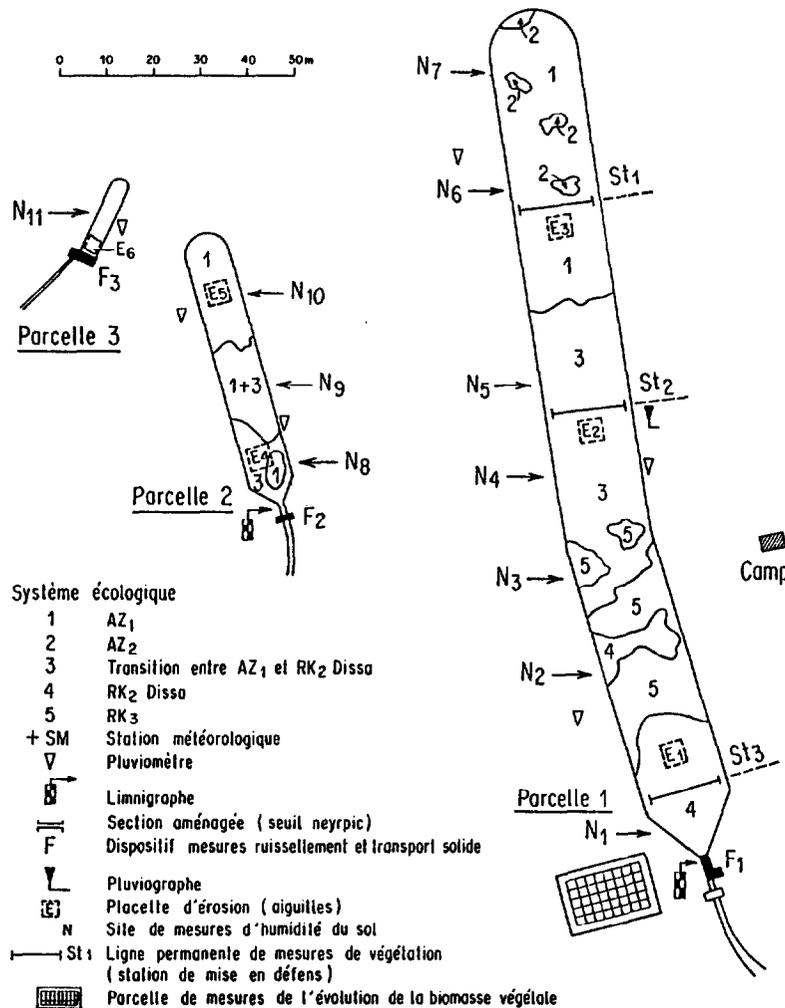


FIG. 1. — Exemple de dispositif permettant la collecte de mesures en mode diachrone, en vue d'une étude intégrée (FLORET et PONTANIER, 1982).

Measurement gathering device, in diachronic mode, for an integrated survey.

la végétation en zone aride, et de comparer l'efficacité des différents systèmes écologiques vis-à-vis de l'eau utilisée pour la production végétale. La méthode la plus utilisée est celle des profils hydriques ; elle consiste, pour chaque tranche de sol élémentaire, à déterminer l'humidité volumique en eau. La détermination des profils hydriques se fait tout au cours de l'année, à des rythmes variables suivant la saison et les événements pluvieux. On augmente les fréquences lors des pluies et pendant les périodes d'activité végétale intense ; au contraire, on les réduit en saison sèche, ou pendant les repos végétatifs (entre 20 et 25 déterminations durant l'année).

Nous ne reviendrons pas sur les méthodes de calcul des réserves hydriques du sol qui ont été abondamment

décrites par HILLEL (1974), HENIN (1976), FLORET et PONTANIER (1982). L'arsenal des techniques pour ces déterminations est très varié : méthode pondérale, chocs thermiques, blocs de plâtre, humidimètre à neutrons, psychromètres, etc.

Cette méthode permet des appréciations globales comparatives et interannuelles ; elle donne les allures de l'évolution des réserves et la forme des accumulations d'eau dans le sol qui peuvent être utilisées pour expliquer par exemples les profils d'enracinement des espèces végétales.

En zone aride, l'eau étant le principal facteur limitant de la production végétale, il est indispensable de suivre les variations saisonnières des réserves en eau du

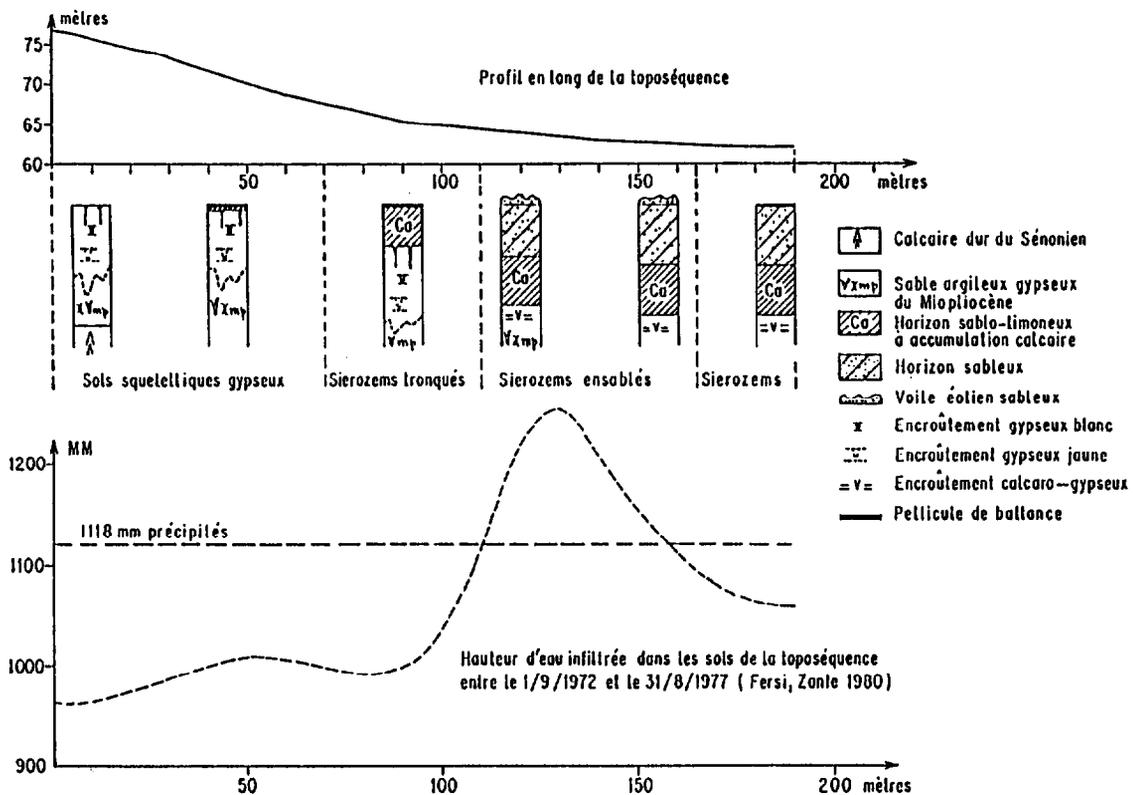


FIG. 2. — Efficacité des précipitations pour la recharge des réserves en eau du sol d'une toposéquence type de la Tunisie présaharienne (Dj. Dissa).

Rainfalls efficiency for recharging groundwater reserves; typical toposéquence in presaharan Tunisia.

sol pour pouvoir interpréter les évolutions spécifiques de la phytomasse aérienne des phytocénoses. La figure 3 montre un exemple de présentation des résultats permettant des comparaisons interannuelles de cette phytomasse pour un même système écologique ainsi qu'entre plusieurs systèmes écologiques.

Pour présenter les résultats d'un suivi hydrique des sols, on peut aussi retenir comme variable, la réserve d'eau disponible pour la végétation (Rd mm) qui s'exprime par :

$$Rd = \int_0^z dz (H_{vi} - H_{VPF})$$

où H_{vi} = humidité volumique à l'instant i
 H_{VPF} = humidité volumique équivalente à $\Phi = -16$ bars
 z = profondeur atteinte par les racines

A partir de ces valeurs calculées horizon par horizon, il est possible d'établir des calendriers annuels des disponibilités en eau pour la végétation. C'est ce qui

apparaît sur le tableau II où ce type de calendrier, en comparant un sol sableux (RK3) et un sol limoneux (AA1), montre un pédoclimat nettement plus aride pour la végétation sur le type limoneux (FLORET et PONTANIER, 1982).

EVAPOTRANSPIRATION RÉELLE.

EFFICIENCE DE L'EAU POUR LA PRODUCTION VÉGÉTALE

En zone aride, en l'absence de drainage ou d'apport dû à une nappe phréatique, l'évapotranspiration réelle (ETR) d'un système écologique est calculée par :

$$ETR = Pe(t_1, t_2) + (St_1 - St_2)$$

où $Pe(t_1, t_2)$ est la hauteur des précipitations efficaces (en mm) entre t_1 et t_2 et où St_1 et St_2 (en mm) sont les réserves en eau totale à t_1 et t_2 .

Suivant le rythme des mesures de St , on peut l'exprimer par décades, quinzaines, mois... ou bien lui donner une valeur moyenne journalière (mm · j⁻¹) pour certaines périodes actives ou de repos de la végétation.

Concernant l'efficacité de l'eau du sol pour la production végétale, on peut simplement l'exprimer en fonction des précipitations totales ou efficaces, ou fournir des modèles de régression entre l'accroissement moyen journalier de la production végétale et l'ETR moyenne journalière.

Par exemple, pour une steppe sableuse en zone aride tunisienne, entre la fin de l'automne et la fin du printemps, les mêmes auteurs trouvent :

$$\log V = 1,29 \overline{\text{mETR}} - 0,55 \quad (r^2 = 0,86)$$

où V = accroissement moyen journalier en kg M.S ha⁻¹ . j⁻¹

$\overline{\text{mETR}}$ = ETR moyenne journalière en mm . j⁻¹

Il est aussi important de connaître la part de l'évaporation contributive à l'ETR. Pratiquement, on la détermine par la méthode des profils hydriques, soit

en stérilisant le sol et en simulant le couvert végétal par des obstacles artificiels, soit indirectement en arrêtant l'évaporation grâce à un « mulch » ; dans ce dernier cas, on mesure alors la transpiration. Elle peut être aussi calculée par modélisation numérique (FLORET *et al.*, 1982 ; RAMBAL et CORNET, 1982).

Ces différentes méthodes permettent de connaître alors les hauteurs d'eau transpirée. Ainsi en Tunisie aride, entre 1971 et 1977, FLORET et PONTANIER (1982) montrent que le rapport Evaporation/ETR est de 52 % sur une steppe sableuse.

L'expression des résultats concernant l'érodabilité des terres

Concernant la mesure de l'érosion d'hydrique en mode diachrone, les méthodes les plus couramment utilisées sont :

TABLEAU II
Répartition des disponibilités en eau du sol pour la végétation de deux milieux de la Tunisie présaharienne (point de flétrissement à pF 4,2)
Distribution of soil water availabilities for two environments vegetation, in presaharan Tunisia

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Nombre de mois dans l'année	Précipitations totales (mm)
STEPPE SABLEUSES RK ₃	1971-72	0-50	+		+			+	+	+				5	191
		50-120							+	+	+			3	
	1972-73	0-50	+	+	+	+	+	+	+					7	210
		50-120	+	+	+	+	+	+	+	+	+			9	
	1973-74	0-50				+	+	+	+	+				5	315
		50-120				+	+	+	+	+	+			7	
	1974-75	0-50	+	+	+	+		+	+					6	186
		50-120		+	+	+			+	+				6	
	1975-76	0-50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		10	295
		50-120			+	+	+	+	+	+	+	+		9	
1976-77	0-50			+	+		+	+					3	84	
	50-120												0		
TERRE DE SEGUI (jachère) AA ₁	1972-73	0-50			+	+	+		+					4	164
		50-120												0	
	1973-74	0-50				+	+	+	+					4	371
		50-120					+	+	+	+	+			5	
	1974-75	0-50						+	+	+				3	167
		50-120												0	
	1975-76	0-50	+		+		+	+	+	+				6	357
		50-120					+	+	+	+	+	+		6	
	1976-77	0-50												0	96
		50-120												0	

Nous considérons que la disponibilité en eau doit se maintenir au moins 7 jours dans le mois pour être mentionnée (+) ; en outre (+) ne signifie pas forcément une disponibilité en eau dans la totalité de la tranche considérée.

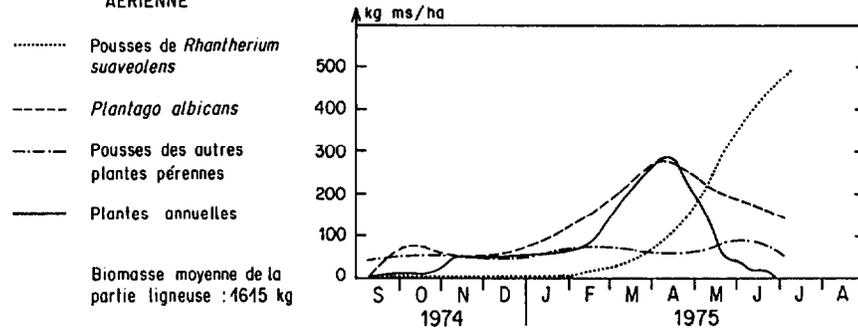
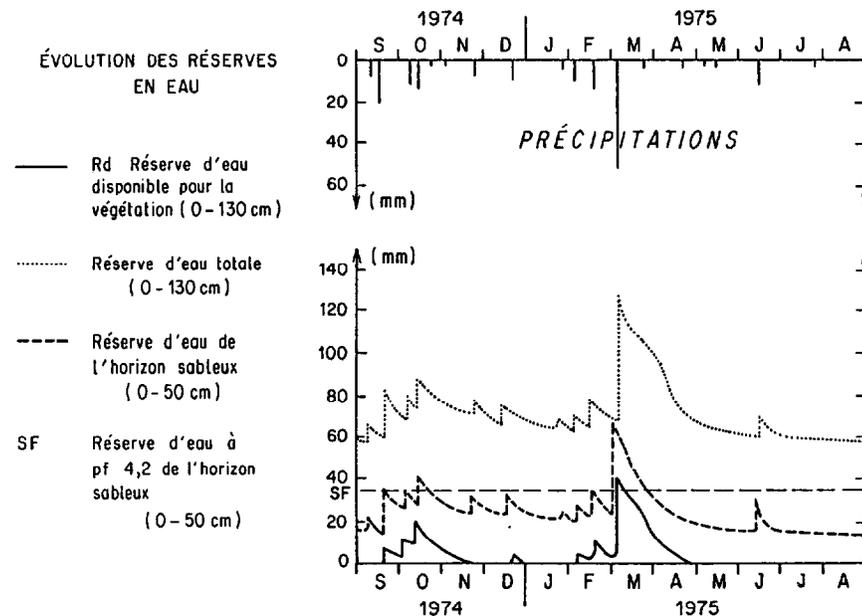
ÉVOLUTION DE LA PHYTOMASSE
AÉRIENNEÉVOLUTION DES RÉSERVES
EN EAU

FIG. 3. — Exemple de mesure relative à l'évolution saisonnière et interannuelle de la phytomasse aérienne d'un système écologique, en relation avec le bilan d'eau (d'après FLORET et PONTANIER, 1982).
 Measurement related to seasonal and interannual evolution of aerial phytomass in an ecological system, in relation with waterbalance.

— Une méthode globale à l'exutoire du bassin : à l'occasion de chaque crue, par détermination des concentrations des charges solides dans les eaux, la mesure des débits permet la reconstitution d'un turbidigramme et le calcul de la masse solide transportée. Cette méthode ne permet pas d'analyser les paramètres liés à l'aménagement des versants, et ne rend pas compte de la diversité des situations écologiques. En outre, dès que la surface du bassin versant dépasse quelques hectares, on éprouve d'énormes difficultés à conclure sur les aménagements antiérosifs à mettre en place.

— Une méthode plus analytique qui permet sur chaque système écologique, soit sur des parcelles d'érosion équipées de fosses à sédiments avec ou sans placette, soit

sur placettes équipées d'aiguilles dont on mesure périodiquement la longueur de l'élément dépassant, de quantifier l'érosion spécifique. Cette méthode vient souvent en complément de la précédente.

En général, la deuxième méthode donne des résultats très supérieurs à la première : son avantage est de fournir des données comparatives sur la sensibilité à l'érosion des systèmes, ainsi que des renseignements sur les contributions relatives à l'érosion de chaque système écologique.

Ainsi, sur un bassin de 18,1 km² de savanes arbustives du Nord-Cameroun (THEBE, 1987), celle-ci s'exprime par :

$$Er = 1368 (1 - e^{-0,053 Lr})$$

où Er = érosion déterminée par turbidigramme en tonnes . km⁻²

et Lr = lame ruisselée en mm.

A l'échelle du champ, des facteurs autres que le ruissellement interviennent. Ainsi, le même auteur, sur un petit bassin de 3 000 m² présentant une importante variation du couvert végétal au cours de la saison des pluies, montre que :

$$Er = 7,84 Lr - 1,66 CV + 13,6 \quad (r^2 = 0,894)$$

où CV = couvert végétal en %

A l'échelle du champ, pour caractériser la sensibilité à l'érosion hydrique d'un type de système écologique ou pour pouvoir suivre en fonction des aménagements et du type d'utilisation des terres, les variations de la sensibilité, certains auteurs préfèrent exprimer leurs résultats obtenus sur parcelles par un indice qui traduit l'aptitude de la pluie et du ruissellement à arracher et éroder les terres.

On l'exprime par : $er = \frac{Er}{Lr}$ par unité de surface.

En ce qui concerne l'érosion éolienne, la méthode consistant à répartir des aiguilles dépassant du sol sur 4 ou 16 m² suivant le degré d'hétérogénéité du milieu, peut être utilisée. surtout si les ensablements sont importants. Dans ce cas l'utilisation d'une jauge de profondeur ($\sigma = 0,1$ mm) permet des estimations à 1,5 t/ha près (FLORET et PONTANIER, 1982). La mesure de la partie de l'aiguille dépassant du sol est aisée, et permet d'établir des courbes de suivis saisonniers et pluriannuels de l'ensablement et/ou de la déflation (fig. 4).

UNE MÉTHODE D'ÉTUDE EN MODE SYNCHRONES : LA SIMULATION DE PLUIE

Le principe de la simulation de pluie est de produire sur une surface élémentaire, à partir d'un appareil (simulateur de pluie ou infiltromètre à aspersion) un flux de gouttes d'eau de taille et d'énergie cinétique comparable à celui des gouttes de pluies naturelles de la région où se déroule l'étude. Par ailleurs, on maîtrise les débits (intensités), les volumes (hauteurs) et les durées de ces flux. L'objectif de ces simulations est d'obtenir rapidement des mesures de ruissellement et d'érodabilité sous différents types de précipitations. Il ne faut donc pas chercher à opposer la méthode en mode synchrone et celle en mode diachrone ; elles n'ont pas les mêmes objectifs. Nous y reviendrons dans la conclusion.

Depuis plus de deux décennies, de nombreux auteurs ont adopté les techniques d'études sous pluies simulées. Parmi ceux-ci, on peut citer : MUSGRAVE et HOLTAN (1964),

puis LAFFORGUE et NAAH (1976), ASSELINE et VALENTIN (1978), ROOSE et ASSELINE (1978), CASENAVE (1981-1982), CHEVALLIER (1982), ALBERGEL et BERNARD (1984a et b), PONTANIER *et al.* (1985), ESCADAFAL *et al.* (1986), TREVISAN (1986), ALBERGEL (1987), MTIMET (1987), THEBE (1987), CASENAVE et VALENTIN (1988).

Les dispositifs de mesure

Nous ne nous étendrons pas sur ceux-ci ; ils ont été largement décrits par les auteurs cités précédemment. Nous rappellerons cependant les principales caractéristiques d'un « mini-simulateur » ou « infiltromètre par aspersion », qui est actuellement très utilisé et qui a été mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1978).

Cet appareil est constitué d'un bâti-cadre de 4 m de hauteur, au sommet duquel un gicleur animé d'un mouvement de balancier arrose le sol. Le réglage de l'amplitude des oscillations de ce balancier permet d'arroser une surface du sol variable, et obtenir ainsi des intensités plus ou moins fortes, puisque le débit d'alimentation est constant. les caractéristiques du gicleur, le débit

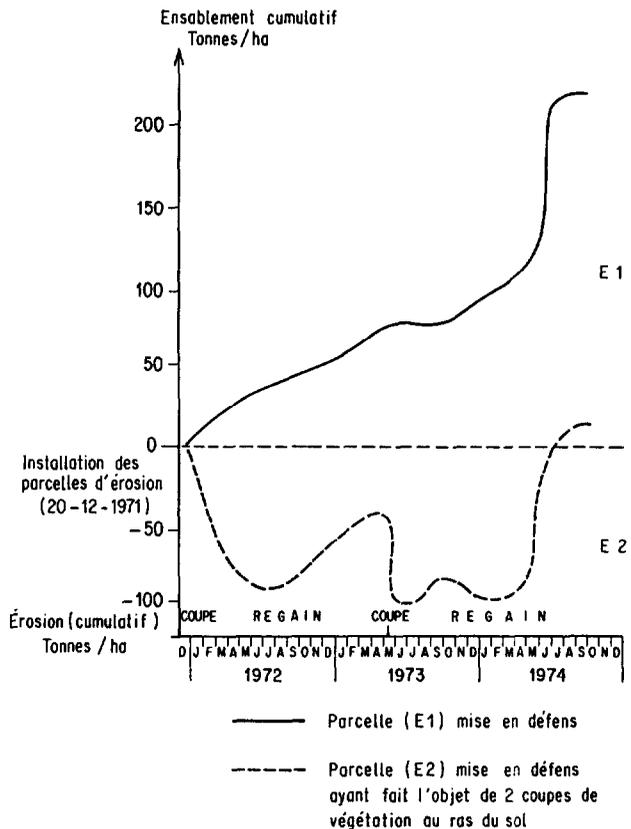


FIG. 4. — Mesure de l'érosion et de l'accumulation du sable éolien (d'après FLORET *et al.*, 1982).

Erosion and windsand accumulation measurement.

d'alimentation et la pression d'eau sont tels que l'on reproduit la taille et l'énergie cinétique des gouttes de pluie de la région.

Au sol, la parcelle (1 m²) est limitée par un cadre carré métallique, enfoncé dans le sol ; l'eau qui ruisselle est recueillie dans une cuve équipée d'un limnigraphe à mouvement rapide. Des prélèvements de l'eau ruisselée permettent d'en mesurer la turbidité à intervalles réguliers. Les contrôles de l'état hydrique des sols testés sont effectués tout au cours d'une campagne.

Protocoles d'essais

C'est un aspect très important de la méthode : il dépend du thème d'étude choisi. Par exemple, on peut se fixer comme objectifs, 1. pour un même type de sol, de mettre en évidence à une période de l'année, l'influence sur l'infiltration du couvert végétal, 2. ou bien contrôler sur une même terre l'influence des pratiques culturales, 3. ou encore comparer la réaction à l'infiltration des différents systèmes écologiques d'une région, 4. vérifier l'influence de l'humidité du sol sur l'infiltration, 5. fixer les normes de l'irrigation par aspersion sur tel ou tel type de culture et de sol en fonction du développement de la culture, 6. tester l'averse décennale, etc.

Le champ d'investigation est donc très large. Une fois le thème choisi, il convient de fixer un plan d'échantillonnage des sites à tester et d'établir un protocole d'averses conforme au thème de l'étude.

Dans le tableau III, BAHRI *et al.* (1988) proposent un protocole pour tester en Tunisie centrale et en début de saison des pluies, une séquence pluvieuse de fréquence de retour décennale, afin de contrôler ses effets sur une terre ayant subi différentes préparations.

Influence des états de surface

Il n'est plus besoin en zone aride de démontrer l'importance des états de la surface du sol sur la régulation des flux d'eau, sur les phénomènes d'érosion et sur l'évolution de la végétation. Avec le développement des méthodes d'étude sous pluies simulées, il s'est avéré indispensable d'améliorer nos connaissances dans ce domaine et surtout de systématiser et de codifier ce type d'observations en vue de l'interprétation des données concernant l'infiltrabilité, l'érodibilité et le ruissellement (BOIFFIN et SEBILLOTE, 1976 ; FLORET et PONTANIER, 1982 ; PONTANIER *et al.*, 1985).

ESCADAFAL (1981 et 1989) donne à différentes échelles quelques types de constituants élémentaires physiques rencontrés en Tunisie présaharienne, ainsi que leurs relations et organisations spatiales. CASENAVE et VALENTIN (1988) proposent de même, pour la zone sahélienne, une clef de détermination à plus petite échelle des types de surfaces élémentaires qui sont déjà un ensemble de constituants.

Nous rappelons ici quelques notions sur le rôle des différents constituants et de leurs arrangements ou organisations à la surface du sol.

1. Outre le critère de pente, une surface peut être lisse, rugueuse, à microrelief ondulé dans le sens de la pente ou perpendiculairement à la pente, présenter des micro-zones endoréiques ou bien des bosses, etc. ; cet ensemble de caractères, dont le rôle est déterminant pour l'infiltration, le ruissellement et l'érosion, peut être englobé sous le terme de « rugosité ».

Les mesures s'effectuent en général par des observations ponctuelles répétées le long de lignes.

Si n est le nombre de mesures effectuées sur une ligne

TABLEAU III
Exemple de caractéristiques des pluies simulées à Sidi Ali Salem (26 et 27 août 1986)
Salient features of simulated rainfall results

n° pluie	Temps depuis dern. pluie	Intensité mm/h	Durée (mn)	Hauteur (mm)	I _{max} 30 (mm/h)
P1	> 3 mois	20 40 80	15 15 15	5 10 20	60
P2	24 h	30 60	20 15	10 15	45
P3	24 h	120	10	20	(40)

I_{max} 30 = Intensité maximale en 30 minutes.

j , m le nombre de lignes, et d la distance constante entre deux points consécutifs, i et $i + 1$ présentant une différence de niveau $h_i - h_{i+1}$. On appellera indice de rugosité $R \%$ (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976 ; ESCADAFAL, 1981) le rapport :

$$R \% = \frac{L - L_0}{L} \times 100$$

où $L_0 = m (n - 1) d$

$$L = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{d^2 + (h_i - h_{i+1})^2}}$$

On peut supposer que cet indice de rugosité trouve son maximum de signification lorsqu'il est exprimé dans le sens de la pente. Cependant, on peut l'obtenir dans le sens orthogonal à la pente, ainsi que pour l'ensemble des deux dimensions (MTIMET *et al.*, 1988).

2. La surface du sol est constituée, en zone aride et semi-aride, d'un grand nombre de constituants physiques apparents (pellicule de battance, voile éolien, gravillons, terre nue, litière, croûte, etc.) dont les effets sur les flux hydriques ne vont pas toujours dans le même sens. Ainsi, la pellicule de battance diminue l'infiltration, alors qu'un voile sableux éolien l'augmente. En revanche, une surface pierreuse et rugueuse peut diminuer l'infiltration, mais aussi le ruissellement, etc. Ces différents constituants coexistent en général sur de petites surfaces, il convient donc d'en donner les proportions relatives par des *indices de recouvrement* ou d'occupation, ainsi que leur *position relative* le long de la pente ; en effet, à proportions égales, une pellicule de battance située à l'amont d'un voile éolien n'a pas le même effet sur le ruissellement à l'exutoire si la succession de ces deux éléments est inversée.

Ces différents indices peuvent être regroupés pour les interprétations, pondérés les uns par rapport aux autres, etc. ; en effet, certains des constituants élémentaires ont tendance, à différents degrés, à ralentir l'infiltration de l'eau dans le sol, alors que d'autres la favorisent.

En ce qui concerne la cartographie des constituants de la surface du sol, il est possible de réaliser, manuellement ou automatiquement, une représentation de la distribution sur la surface élémentaire de 1 m^2 de ces différents constituants (fig. 5).

3. L'influence de la végétation sur le ruissellement, l'infiltration et l'érosion se manifeste d'une part par l'interception de la pluie, réalisée par les organes aériens qui diminuent l'énergie cinétique des gouttes d'eau, donc l'effet « splash », et d'autre part par une meilleure infiltration due aux conditions créées par les organes souterrains, et par un obstacle au ruissellement en surface. Dans le cas des zones arides, l'interception est faible.

En revanche, la végétation en rosette et/ou prostrée et les litières directement en contact avec le sol, sont très importantes pour l'infiltration. Ces derniers éléments de la végétation doivent être assimilés, mesurés et traités comme les différents constituants physiques de la surface (au même titre qu'un voile éolien, une litière). Ils provoqueront des effets comparables sur les flux d'eau, etc.).

Dans le cas de la partie de la végétation non en contact avec le sol et qui diminue l'énergie cinétique des pluies, ce sont les « biovolumes » que l'on prend en compte. Dans ces biovolumes la végétation est plus ou moins « dense ». Il faut donc les évaluer et les localiser sur la surface élémentaire testée. Pour cela, on note le nombre de contacts entre la végétation et une aiguille descendue verticalement jusqu'au sol.

Ainsi, si on a réalisé n mesures sur la surface élémentaire de 1 m^2 , et si sur ces n mesures, $n - i$ ont présenté un total de m contacts avec la végétation aérienne :

- la « densité » de végétation aérienne moyenne sur la parcelle sera $\frac{m}{n}$,

et

- la « densité » réelle de la végétation aérienne, là où elle est présente sera $\frac{m}{n - i}$.

Ici encore, on peut représenter par une cartographie automatique la répartition spatiale sur 1 m^2 de la projection au sol de la végétation, de sa densité et de sa position relative par rapport à la pente et aux différents constituants de la surface (fig. 5).

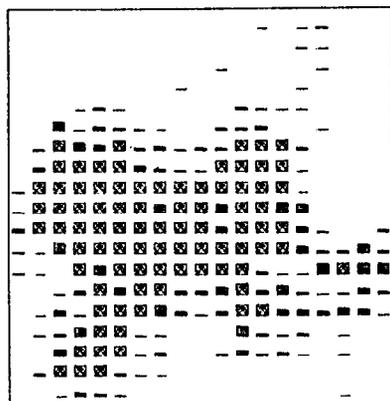
Présentation et expression des résultats

Le dépouillement automatique des résultats acquis sous pluies simulées (ESCADAFAL et ASSELINE, 1985), permet l'obtention (fig. 6) des hyétoigrammes, des courbes de variation du débit liquide et solide, des valeurs de la lame ruisselée, de la pluie d'imbibition (P_i), de la pluie efficace (PE qui est celle qui provoque le ruissellement), de la lame infiltrée (W) et de la valeur de l'érosion sur 1 m^2 par séquence. Concernant les états de surface, un autre logiciel (MTIMET *et al.*, 1988) effectue le calcul des indices de rugosité, l'expression du biovolume (végétation aérienne moyenne sur l'ensemble de la parcelle ou densité de contacts par verticale présentant au moins un contact aérien avec la végétation), la fréquence des différents états de surface reconnus, ainsi que les tracés des cartes de végétation aérienne et d'état de surface. Ces documents constituent les résultats élaborés qui permettront un certain nombre d'interprétations, allant de l'évaluation globale (tabl. IV) concernant l'influence du travail du sol sur le comportement des terres (BAHRI *et al.*, 1988) à la présentation de fonction de production de la lame ruisselée de type

LIEU : CIT HYD B FAROUA
 DATE : 130387
 N° DE PARCELLE : 6
 PENTE : 5
 OPERATEUR : BECTM
 REFERENCE PLUIE : CCH6

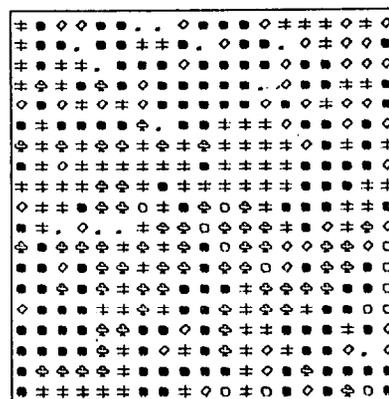
Q...Végétation au sol ... ☐
 W...Pellicule de battance ... ●
 E...Recouvrement sableux ... ☒
 R...Sol nu sans battance ... □
 T...Sable - grossier ... †
 Y...Croûte calcaire ... =
 U...Gravillons, nodules ... •
 I...Cailloux ou pierres ... ◇

Rugosité sens colonne (pente : 0.1071
 Rugosité sens ligne : 0.0804
 Rugosité ligne + colonne : 0.0940



Végétation aérienne

Végétation aérienne moyenne : 3.2465
 Densité de végétation aérienne : 5.6346



Etats de surface

Végétation au sol : 0.1717
 Pellicule de battance : 0.3629
 Recouvrement sableux : 0.0000
 Sol nu sans battance : 0.0360
 Sable - grossier : 0.2576
 Croûte calcaire : 0.0000
 Gravillons, nodules : 0.0332
 Cailloux ou pierres : 0.1385

FIG. 5. — Exemple de présentation de paramètres d'état de surface.
 Presentation of surface state parameters.

$L_r = \Phi$ (pluie utile, végétation aérienne, pellicule de battance, pente...) ou des formules de détermination de l'érosion. Il est possible de déterminer avec ce type d'approche les intensités limites de ruissellement (CASENAVE et VALENTIN, 1988).

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Généralisation des résultats. Changement d'échelle

La démarche pour une caractérisation écologique des régimes hydriques et de l'érodibilité des sols *en mode diachrone* comporte deux étapes principales :

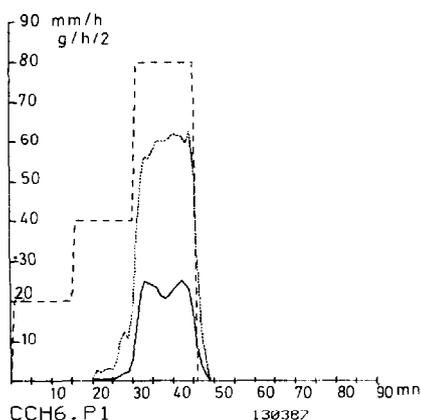
1. Caractérisation des systèmes écologiques d'une région au moyen de nombreux relevés dans chacun d'entre eux comportant des indications sur la flore, le couvert végétal, la phytomasse, les caractéristiques physiques et hydriques du sol, etc. On cherche à comprendre les rela-

tions qui existent entre ces systèmes en réalisant ces observations, par exemple, le long de toposéquences.
 2. Installation de stations de mesures localisées au mieux grâce aux relevés et à la cartographie de ces écosystèmes, pour être bien représentatives des plus importants d'entre eux. Mesures des relations climat-sol-plante durant plusieurs années. Ces stations ne peuvent pas être très nombreuses en raison de la quantité de mesures nécessaires.

L'extrapolation spatiale des résultats est donc au moins partiellement prévue au départ grâce à la cartographie. En ce qui concerne l'extrapolation temporelle, à des types d'années pluviométriques non observées, on peut faire appel à la modélisation. Des modèles de croissance des plantes en relation avec l'utilisation de l'eau du sol par la végétation et la demande évaporative de l'atmosphère ont été développés, par exemple par GOODALL (1973a et b), VAN KEULEN (1975), FLORET *et al.* (1982), RAMBAL et CORNET (1982), etc. De l'avis des

*** INFILTROMETRE ***
ESSAI No CCH6.P1

Date : 130387
Heure(h.mn) : 10.49
t d.r.t(mn.s) : 20.3
ht d.r.t (mm) : 20.1
Vol.ech (ml) : 250
Nbre séquen. : 3
Nbre prelevt : 4
t fin r.t(mn) : 49



*** INFILTROMETRE ***
ESSAI No CCH6.P1

TEMPS (mn)	RUISSLT (mm/h)	DEBIT SOL. (g/h)
20	0.0	0.0
21	4.8	0.9
22	2.4	0.5
23	0.6	0.1
24	5.4	1.2
25	0.6	0.1
26	4.8	1.2
27	7.2	1.8
28	18.0	4.7
29	9.0	3.6
30	10.8	5.0
31	31.2	21.1
32	60.0	40.0
33	57.0	54.3
34	60.0	53.5
35	51.0	42.4
36	66.0	50.8
37	57.0	40.4
38	63.0	40.8
39	57.0	39.3
40	66.0	48.3
41	60.0	46.4
42	63.0	51.3
43	60.0	51.4
44	57.0	41.0
45	72.0	44.0
46	27.0	13.2
47	5.4	2.0
48	3.6	0.9
49	1.8	0.2
50	0.0	0.0

No SEQ	DUREE (mn)	INTENS. (mm/h)	HAUTEUR (mm)	LRUISS. (mm)	PI (mm)	PE (mm)	Kru (%)	W (mm)	EROS (g)
1	15.0	20.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0	5.0	0.0
2	15.0	40.0	10.0	1.1	3.7	6.3	10.6	8.9	0.3
3	15.0	80.0	20.0	14.7	0.0	20.0	73.4	5.3	11.2
TOT.	45.0	46.0	35.0	15.7	8.7	26.3	44.9	19.3	11.6

FIG. 6. — Exemple de présentation des résultats d'une pluie simulée.
Présentation of a simulated rainfall results.

auteurs eux-mêmes, en raison de la complexité des processus entrant en jeu, on est loin encore d'un modèle général applicable à l'ensemble des systèmes d'une zone qui permettrait de sortir du cadre stationnel où sont effectuées les mesures. La généralisation exige donc encore du spécialiste une grande connaissance de la variabilité spatiale de l'état de surface du sol, de son épaisseur, de sa texture, de la structure et de la quantité de végétation présente, etc.

L'extension à l'ensemble d'un bassin-versant ou d'une région, de résultats concernant le régime hydrique et l'érodabilité des terres *en mode synchrone* par des mesures ponctuelles et instantanées est un problème délicat auquel sont confrontés les scientifiques et les aménagistes. La principale contrainte à cette extension est due

à l'hétérogénéité spatiale et à l'échelle de perception des résultats comme le soulignent SHARMA *et al.* (1980), WALLING (1983). SWAPALAN et WOOD (1986) montrent que si le ruissellement et l'infiltration sont fortement corrélés à la pluie en début d'averse, ce sont les propriétés des terres et les caractéristiques de la végétation qui, par la suite, conditionnent en grande partie ceux-ci. De même MUSGRAVE et HOLTAN (1964), BEVEN (1986) s'accordent pour reconnaître le rôle déterminant de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques et biotiques et du comportement hydrodynamique et hydraulique des sols.

Le problème posé est donc de savoir, comment appréhender l'étude des comportements hydrauliques de l'ensemble des différentes unités élémentaires de milieu

TABLEAU IV
 Résultats globaux des simulations de pluie à Sidi Ali Ben Salem
 Total Results of rainfall simulations

Parcelle	Ref. Pluie	Intensité mm/h			Hauteur (mm)		KE %	Kru %	Erosion kg/ha
		I ₁	I ₂	I ₃	Précipitée	Infiltrée			
SABS ₁ Labour trisocs (avant P ₁)	P ₁	24,0	39,0	79,8	35,7	35,2	98,7	1,4	0
	P ₂	30,5	60,0	-	25,2	25,1	99,6	0,3	0
	P ₃	120,0	-	-	20,0	19,4	97,0	3,0	0
	Total	-	-	-	80,9	79,7	98,5	1,5	0
SABS ₂ Labour poly- disques perp. pente (avant P ₁)	P ₁	21,0	39,5	80,5	35,1	33,7	96,0	3,9	102
	P ₂	30,0	59,0	-	24,8	21,1	85,1	14,8	238
	P ₃	120,0	-	-	20,0	11,1	55,5	44,5	1564
	Total	-	-	-	79,9	65,9	82,5	17,5	1904
SABS ₃ Sol non tra- vaillé, très battant	P ₁	20,0	39,5	80,0	34,9	21,6	61,9	38,4	596
	P ₂	29,5	58,6	-	24,5	12,6	51,4	48,4	357
	P ₃	120,0	-	-	20,0	5,6	28,1	79,9	874
	Total	-	-	-	79,9	39,8	49,8	50,2	1827
SABS ₄ Labour poly- disques, sens de la pente (avant P ₁)	P ₁	22,0	40,0	80,0	35,5	32,8	92,4	7,6	163
	P ₂	30,0	61,4	-	25,4	18,5	72,8	26,9	320
	P ₃	120,0	-	-	20,0	6,8	34,0	65,9	2698
	Total	-	-	-	80,9	58,1	71,8	28,2	3181

naturel composant un bassin-versant ? Comment reconstruire à partir de cette démarche analytique le bilan à l'exutoire du bassin, d'une unité de production ou d'un champ, et éventuellement comment construire des modèles prédictifs de ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion ?

Concernant l'extension des données instantanées du régime hydrique des terres, il est possible pour chaque type de système écologique d'établir des fonctions de production du ruissellement, de l'infiltration, prenant en compte différents paramètres (caractéristiques des averses, couvert végétal, état d'humidité du sol, etc.) (BOURGES *et al.*, 1984 ; THEBE, 1987 ; CCE, 1988 ; PONTANIER et THEBE, 1989).

Concernant l'extension des observations ponctuelles aux bassins versants ou au champ, deux méthodes sont couramment utilisées :

1. La plus simple consiste, sur la base de fonctions de production ou de coefficients établis sur parcelle, à transposer linéairement, à l'ensemble du bassin, les coefficients d'infiltration moyens ou, en année humide, les ruissellements de chaque aire contributive délimitée par

une cartographie thématique (FLORET *et al.*, 1989 ; ALBERGEL, 1987 ; THEBE, 1987 ; LAJILI GHEZAL, 1988).
 2. Une autre, plus sophistiquée, met en œuvre des modèles à discrétisation spatiale (GIRARD *et al.*, 1981) qui utilisent les fonctions de production de chaque élément d'un « maillage », ainsi que des fonctions de transfert (CHEVALLIER *et al.*, 1985 ; ALBERGEL, 1987).

Complémentarité des deux approches

Il est intéressant de chercher à dégager l'intérêt respectif des deux types d'approche pour les études concernant la caractérisation écologique des régimes hydriques et de l'érodabilité des terres en zone aride.

CASENAVE et VALENTIN (1988) mentionnent que les nombreuses études réalisées jusqu'à présent dans le domaine des relations eau-sol se heurtent à :

— « Un problème d'analyse des paramètres qui exercent une influence sur l'infiltration et le ruissellement. Du fait de leur nombre et de leurs interactions, il est difficile, sous pluies naturelles, de mettre en évidence leur rôle respectif. Le simulateur de pluie, qui permet,

de fixer à volonté les caractéristiques des averses, l'état d'humectation du sol par des arrosages successifs, de tester différents types de sols, d'états de surface, de couvertures végétales ou de pentes, autorise une analyse beaucoup plus fine des phénomènes.

— Un problème de *durée des études*. Pour obtenir un résultat fiable sous pluies naturelles, il est nécessaire de prolonger les mesures sur plusieurs années, surtout en zone aride où les pluies sont rares et irrégulières. Grâce aux mesures sous pluies simulées, la durée des études a pu être réduite de façon très sensible pour un résultat d'une précision sensiblement égale, sinon supérieure dans certains domaines, à celle des mesures classiques.

— Un problème d'*extension spatiale des résultats*. Du fait de leur durée, les mesures classiques ne sont effectuées que sur un petit nombre de sites. Les mesures sous pluies simulées, beaucoup plus rapides, permettent pour un même investissement de tester un nombre de sites bien plus élevé. De plus, les mesures sous pluies simulées ont révélé qu'en zone aride, seule la cartographie très détaillée des états de surface permet une extrapolation fiable des résultats acquis sur parcelles au niveau du petit bassin-versant. »

Un exemple est donné par PONTANIER *et al.* (1985) pour le Nord-Cameroun, où un test uniforme appliqué à un ensemble de systèmes écologiques permet d'aider à la hiérarchisation des unités de milieu, en vue par exemple d'une cartographie thématique sur le comportement hydrodynamique, et la sensibilité des terres à l'érosion hydrique (PONTANIER *et al.*, 1985).

— « Un problème d'*expérimentation*. Les mesures d'infiltration ont été réalisées, dans la plupart des cas, à l'aide de techniques interdisant le ruissellement, (MÜNTZ, PIOGER, etc.) qui détruisent ou modifient les croûtes superficielles et sont donc très éloignées de la réalité physique des phénomènes. Les études sous pluies simulées ont montré que, dans le cas général, les valeurs

d'intensité d'infiltration ne peuvent être déduites de tests infiltrométriques de type MÜNTZ ; en effet, non seulement les valeurs ne sont pas du même ordre de grandeur, mais elle ne correspondent même pas à un classement identique, les réactions de la surface du sol à l'impact des gouttes de pluie n'étant pas les mêmes que pour l'apport d'une épaisse lame d'eau. »

Les méthodes sous pluies simulées dans l'étude des régimes hydriques et de l'érodabilité des terres des zones arides ne visent cependant pas à remplacer les études en mode diachrone pluriannuel.

En effet, le mode synchrone pose un problème d'échelle de temps (PONTANIER et THEBE, 1989). On réalise en général les campagnes de simulation, sur des périodes de très courte durée (4 à 10 jours) qui ne permettent pas de prendre en compte le développement de la végétation. Par ailleurs, le suivi de profils hydriques en relation avec la croissance végétale donne des renseignements sur le fonctionnement hydrique du sol (redistribution de l'eau dans le sol, évaporation, etc.) que ne peuvent fournir des mesures de ruissellement instantanées avec simulateur.

Dans le cas des études de caractérisation du fonctionnement hydrique d'un système écologique en relation avec le développement de la végétation, ou de celui d'un bassin-versant (approche systémique), se pose cependant le problème de durée des études, spécialement en zone aride. Les méthodes utilisant le mode synchrone, permettent une réduction de cette durée. Il ne s'agit pas de substitution, mais d'interventions complémentaires, judicieusement réparties dans l'espace et le temps, qui sont conduites en parallèle avec celles menées en mode diachrone.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 18-10-1989.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), 1987. — Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso. Du m² au km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Paris, 341 p.
- ALBERGEL (J.), BERNARD (A.), 1984a — Calage du modèle simulateur. Prédiction de la crue décennale sur le bassin versant de Binnde. ORSTOM, Ouagadougou, 50 p.
- ALBERGEL (J.), BERNARD (A.), 1984b — Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de Kazanga. ORSTOM, Ouagadougou, 79 p.

- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.), 1978. — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, 15 (4) : 321-349.
- BAHRI (A.), PONTANIER (R.), DRIDI (B.), 1988. — Conséquences des façons culturales en fin de saison sèche sur le régime hydrique et l'érosion des terres du Kairouanais. ES 244.DS., Tunis. 30 p + annexes.
- BEVEN (K.), 1986. — Runoff production and flood frequency in catchments of order. An alternative approach. *In* : Scale problems in Hydrology. VK. Gupta *et al.* eds. D. Reidel Publishing Company : 107-131.

- BOIFFIN (J.), SEBILLOTTE (M.), 1976. — Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse du comportement d'un sol au champ. *Annales Agro.*, 27 (3) : 295-325.
- BOURGES (J.), FLORET (C.), GIRARD (G.), PONTANIER (R.), 1984. — Dynamique de l'eau sur un glaciais du Sud tunisien (type Segui). ORSTOM, Tunis, CEPE/CNRS, Montpellier, 86 p., *multigr.*
- CASENAVE (A.), 1981. — Etude des crues décennales des petits bassins-versants forestiers en Afrique tropicale. Rapport final. ORSTOM, Adiopodoumé, 59 p.
- CASENAVE (A.), 1982. — Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM. sér. Hydrol.*, Vol. XIX, 4 : 207-227.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. — Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM Paris, CCE Bruxelles, 202 p. + Annexes.
- CCE, 1988. — Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord-Cameroun). Rapport final TSD A/216 CAM (5). IRA, IRGM (Cameroun) ; ORSTOM, CEPE/CNRS-Montpellier ; CCE - Bruxelles. 232 p.
- CHEVALLIER (P.), 1982. — Simulation de pluie sur deux bassins-versants sahéliens (Mare d'Oursi-Haute-Volta). *Cah. ORSTOM. sér. Hydrol.* XIX n° 4 : 253-297.
- CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.), BERNARD (A.), 1985. — Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso). 1976-1981. *Trav. et Doc. de l'ORSTOM*, n° 190, Paris, 251 p.
- ESCADAFAL (R.), 1981. — L'étude de la surface des sols dans les régions arides (Sud tunisien). Recherches méthodologiques. ES n° 187, DRES-ORSTOM, Tunis, 64 p., biblio. 13 p.
- ESCADAFAL (R.), 1989. — Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Thèse Université Pierre et Marie Curie. UER Science de la Terre, Paris 317 p.
- ESCADAFAL (R.), ASSELINE (J.), 1985. — Infiltromètre à aspersion. Dépouillement des données de terrain par micro-ordinateur. Programmes pour CASIO PB-700. Direction des Sols, Tunis, 19 p.
- ESCADAFAL (R.), MTIMET (A.), ASSELINE (J.), 1986. — Etude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar, Sud tunisien). ORSTOM, Paris, Dép. B. URB12, 63 p.
- FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), PONTANIER (R.), ROMANE (F.), 1978. — Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement agropastoral des régions arides. D.S., Tunis, IRA Médenine, ORSTOM Tunis. Document technique n° 2, 74 p., 1 carte h.t.
- FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), PONTANIER (R.), ROMANE (F.), 1981. — Dynamique de systèmes écologiques de la zone aride. Application à l'aménagement sur des bases écologiques d'une zone de la Tunisie présaharienne. *Acta Oecologica. Oecol. Applic.*, 2 (3) : 195-214.
- FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), PONTANIER (R.). — Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne (ouvrage collectif sur l'aridité. à paraître, ORSTOM-Paris).
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1982. — L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et Doc. de l'ORSTOM*, n° 150, Paris, 544 p.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1984. — Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot. Fr., 131, Actual. Bot.* (2/3/4) : 265-275.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), RAMBAL (S.), 1982. — Measurement and modelling of primary production and water use in a south Tunisian steppe. *Journal of Arid Environments* (1982) 5 : 77-90.
- GIRARD (G.), LEDOUX (E.), VILLENEUVE (J.P.), 1981. — Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. IX, n° 4* : 35-52.
- GOODALL (D.W.), 1973a. — Ecosystem simulation in the US/IBP Desert Biome. Summer Computer Simulation Conference, Montréal (1973) : 777-780.
- GOODALL (D.W.), 1973b. — Modelling. US IBP Desert Biome Research Memorandum, 73-52. Logan-UTAH, 700 p.
- HENIN (S.), 1976. — Cours de physique du sol. Tome 1 et 2, ORSTOM-EDITEST, Paris, 159 et 221 p.
- HILLEL (D.), 1974. — L'eau et le sol, principes et processus physiques. Vender, 288 p.
- LAAJILI GUEZAL (L.), 1988. — Ruissellement et érosion sur un micro-bassin versant : modélisation et simulation. Impact des travaux de CES. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation, Hydraulique et aménagement rural. INAT, Tunis, 171 p. + annexes.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. XIII, n° 3* : 299-344.
- LE HOUEROU (H.N.), (1987). — Variability of rainfall and its ecological and managerial consequences on natural vegetation, crops and livestock. Communication invitée à Medecos V, Montpellier, juillet 1987. CNRS, Montpellier.
- MTIMET (A.), 1987. — Evaluation de la sensibilité des sols arides à l'érosion hydrique. ES 240. Direction des Sols, Tunis, 51 p.
- MTIMET (A.), PONTANIER (R.), ASSELINE (J.), 1988. — Une méthode de caractérisation, en zone aride et semi-aride, des états de surfaces élémentaires (1 m²) soumises à des averses contrôlées. ES 245, D.S., Tunis. 17 p. + annexes.
- MUSGRAVE (G.W.) and HOLTAN (H.N.), 1964. — Infiltration. In : *Hand Book of Applied Hydrology*, Ven Te Chow ed., Mc Graw H.II, NY.
- PONTANIER (R.), MOKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEYNI-BOUKAR, THEBE (B.), 1985. — Apport de l'infiltromètre à aspersion pour l'évaluation des ressources en sols des zones soudano-sahéliennes du Cameroun. Premières Journées Hydrologiques de Montpellier. *Colloques et Séminaires ORSTOM* : 165-189.

- RAMBAL (S.), CORNET (A.), 1982. — Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose au Sénégal. *Acta Oecologica Oecol. Plant.*, 1982, vol. 3 (17), n° 4 : 381-397.
- ROOSE (E.J.), ASSELINE (J.), avec la collaboration de : BOIS (J.F.), LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), DIALLO (H.), MBO BECHO (G.), SAGOU (J.) et SANOU (T.), 1978. — Mesures des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé. Les charges solide et soluble des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI n° 1, 1978a : 43-72.
- SHARMA (M.L.), GANDER (G.A.) and HUNT (G.C.), 1980. — Spatial variability of infiltration in a watershed. *J. Hydrol.*, 45 : 101-122.
- SWAPALAN (M.), WOOD (E.D.), - 1986. — Spatial heterogeneity and scale in the infiltration reponse of catchments. *In* : Scale problems in hydrology. V.K. Gupta, I. Rodriguez, I. Turbe and E.F. Wood, eds., D. Reidel Publishing Company : 81-106.
- THEBE (B.), 1987. — Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins-versants de MOUDA. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse d'Université. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 238 p. annexes.
- THEBE (B.), PONTANIER (R.), (1989). — Le ruissellement obtenu par simulation de pluie sur parcelles est-il transférable au bassin-versant ? Une étude de cas en zone soudano-sahélienne du Cameroun. (*à paraître* dans *Hydrologie Continentale*, ORSTOM, Paris.
- TREVISAN (D.), 1986. — Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion des sols limoneux cultivés. Thèse Université Orléans, 244 p.
- VAN KEULEN (H.), 1975. — Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Wageningen. Centre for agricultural publishing and documentation, 176 p.