

Comportement sous pluies simulées de sols argilo-limoneux irrigués par submersion ou aspersion

Hachicha M.* Et Pontanier R.**

* INRGREF, 17 rue Hédi Karray, BP n°10 - Ariana 2080, Tunisie

* IRD, pédologue, Directeur de Recherche, décédé en décembre 2003

RESUME

Des simulations de pluies ont été menées sur des parcelles labourées et d'autres non labourées à surface battante dans les périmètres de Kalaât Landelous et Cebalat Borj-Touil. Ces périmètres diffèrent essentiellement par le mode d'irrigation conduisant la surface du sol irrigué à deux états différents. A Kalaât Landelous, l'aspersion génère une croûte de battance. A Cebalat, la submersion conserve les fentes. Les pluies automnales s'exprimant par une bonne infiltration et par conséquent par une meilleure lixiviation des sels n'apparaissent efficaces qu'en présence du labour et de la submersion. Dans les autres cas, les fortes pluies favorisent le ruissellement où la stagnation conduit à la dégradation de la structure par le déplacement des éléments fins vers les microdépressions et l'enrichissement de la surface en limons. La désagrégation mise en place sous lame d'eau ou sous pluies simulées donne lieu à des organisations superficielles qui agissent fortement sur les phénomènes de transferts hydriques et des solutés. Plusieurs aspects apparaissent liés à l'un ou l'autre des modes d'irrigation: aspersion et submersion.

Mots clés: Sol argilo-limoneux - Simulation de pluie – Milieu semi-aride – Irrigation - Basse Vallée de la Mejerda.

Behavior under simulated rains of irrigated clay silty soils by surface or sprinkler

ABSTRACT

Simulations of rains were carried out on plowed parcels and others not plowed with crusting surface in the areas of Kalaât Landelous and Cebalat Borj-Touil. These areas differ primarily by the system of irrigation leading the surface of the irrigated soil to two different states. In Kalaât Landelous, sprinkler system generates a crust. In Cebalat, the surface system preserves the slits. The results of simulation show the rains of low intensities infiltrate more than they give streaming because they modify only slightly the structural soil surface organization, contrary to the rains of high intensities. Ploughing is favorable to the infiltration of water and the reduction of the streaming. The rains are more effective in the surface irrigation. In the case of sprinkler, the strong rains support it streaming where stagnation leading to the degradation of the structure which acts on the transfers phenomena of water and salts.

Key words: Clay silty soil - Simulation of rain – Semi arid region – Irrigation - Low Mejerda Valley.

INTRODUCTION

Les organisations superficielles jouent un rôle déterminant dans le régime hydro-salin des sols et sur la lixiviation des sels surtout en milieu semi-aride. Le phénomène de battance (soil crusting) apparaît à la surface des sols meubles sous l'impact des gouttes de pluie qui détruisent les agrégats de la surface du sol (McIntyre, 1958). Les matériaux arrachés sont redistribués sur place formant un mince film d'épaisseur inférieure à 1 mm, auquel Escadafal (1989) propose le terme de "pellicule de

battance" (structural crusts) par opposition aux croûtes sédimentaires (depositional crusts) qui, par l'entraînement des matériaux, se forment dans les micro-dépressions en constituant des dépôts lités de plusieurs millimètres d'épaisseur. Souvent, lors du dessèchement, ces croûtes se craquent en fragments convexes sous l'effet de tensions internes.

Valentin (1985) définit des niveaux d'organisation des pellicules superficielles (O.P.S) à la fois par leur structure lamellaire et leur cohésion. Ces O.P.S correspondent à des différenciations morphologiques. Elles présentent également des comportements mécaniques, vis-à-vis de la dynamique de l'eau, différents de ceux des matériaux sous-jacents. Les O.P.S possèdent de faibles conductivités hydrauliques qui peuvent être plusieurs fois inférieures à celles du sol sous-jacent. Elles agissent comme une barrière hydraulique (Hillel, 1988). Cette discontinuité de porosité peut également protéger le sol de l'évaporation. De nombreux facteurs conditionnent la conductivité hydraulique saturée (K_s). Selon Sumner (1993), la présence en proportion importante de sodium échangeable s'accompagne généralement d'une baisse de la conductivité hydraulique. Un équilibre s'établit entre le sol et l'eau d'irrigation légèrement saumâtre; la valeur de K_s se maintient alors constante. Lorsqu'il pleut, par contre, le déséquilibre ionique provoque la dispersion des argiles, qui bloquent les pores et K_s se trouve ainsi diminué (Qadir et Schubert, 2002). La dégradation de la structure des sols lourds suite à leur humectation peut se produire par éclatement, compaction, action mécanique des eaux pluviales, gonflement et dispersion.

En Tunisie, la battance des sols est un aspect fréquemment observé dans les sols limoneux irrigués. Floret et *al.* (1989) ont constaté que les sols vertiques mal drainés sont sujets à la battance. Elle est déterminante sur l'efficacité tant de l'infiltration, du ruissellement et de l'évaporation que de la lixiviation des sels. Dans une expérience de lessivage artificiel des sels réalisée dans la plaine d'Utique, le sol fortement salin et sodique a été désalinisé. À côté du drainage, l'efficacité du lessivage a été considérablement améliorée quand la surface du sol a été labourée. Pour analyser le rôle de l'état de la surface du sol dans l'efficacité de la pluie à lixivier les sels, une expérimentation de simulation artificielle de la pluie a été menée sur des parcelles situées dans la Basse Vallée de la Mejerda. L'essai a été réalisé en automne, à la fin du cycle d'irrigation sur des sols ayant été irrigués mais aussi sur des sols fraîchement labourés.

MATERIELS ET METHODES

Le milieu physique

L'expérimentation a été menée dans les périmètres irrigués de Kalaât Landelous et de Cebalat Borj-Touil qui se situent dans la Basse Vallée de la Mejerda (Figure 1). La région présente un climat méditerranéen semi-aride supérieur. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 470 mm (1964-2000). Les terres sont constituées des alluvions argilo-limoneuses calcaires déposées par la Mejerda. Il s'agit de sols peu évolués à caractères d'halomorphie et d'hydromorphie à dominance d'argiles gonflantes. Le périmètre de Kalaât est irrigué par l'eau de l'Oued Mejerda ayant une conductivité électrique d'environ 3,8 dS/m alors que celui de Cebalat est irrigué par les eaux usées épurées traitées ayant une conductivité électrique d'environ 5 dS/m.

La simulation de pluie

Le simulateur de pluie permet de produire un flux de gouttes d'eau, de taille et d'énergie cinétique comparables à celles des gouttes de pluies naturelles (Asseline et *al.*, 1989; Floret et *al.*, 1989). On obtient facilement, par des mesures d'écoulement superficiel et des prélèvements d'eaux turbides, des valeurs de ruissellement, d'infiltration et d'érodibilité. Chaque parcelle sélectionnée pour une expérimentation de simulation de pluie est décrite en terme d'occupation des terres et de caractérisation des états de surface. Pour cela, la méthode des points quadrats est utilisée. L'appareil de lecture des états de surface comprend un cadre mobile équipé latéralement de deux réglettes à 19

encoches (une tous les 5 cm), qui s'adaptent sur le cadre de la parcelle de 1 m². Sur le cadre à encoches, on installe un bâti-potence amovible servant de guide à 19 aiguilles et matérialisant la ligne du sol sur laquelle sont notés le type de contact au sol, le nombre de contacts aériens avec la végétation et les différences de dénivelés par rapport à un niveau de référence. Ce bâti conçu pour être extensible en hauteur, s'adapte sur les encoches latérales du cadre. Les mesures et lectures s'effectuent tous les 5 cm, ligne après ligne, en commençant par l'amont de la parcelle et de la gauche vers la droite en regardant l'amont. On réalise ainsi 19 lectures par ligne ce qui représente 361 points au total pour une parcelle de 1 m².



Figure 1. Localisation des périmètres irrigués de Kalaât Landelous et Cebalat Borj-Touil.

Un programme permet à partir de ces 361 triplets de mesures (hauteur aiguille, état de surface, nombre de contacts avec la végétation), de calculer la rugosité, la densité de la végétation et le pourcentage de chaque état de surface.

Les essais de simulation ont été réalisés sur des sols secs en surface environ un mois après l'arrêt des irrigations. Aussi bien à Kalaât qu'à Cebalat, l'humidité pondérale était de l'ordre de 17 % en surface et 24 % vers 1 m de profondeur (l'humidité à pF 4,2 est d'environ 17 % et à pF 2,7 égale à 28 %). Le sol du périmètre de Kalaât est légèrement plus argileux, moins limoneux, moins salé et aussi pauvre en matière organique et sodique que celui de Cebalat (Tableau 1). Son irrigation par aspersion a conduit à la formation d'une pellicule de battance qui atteint 85 % de l'état de surface (Tableau 2).

Tableau 1. Caractérisation pédologique de la surface des parcelles (0-10 cm), à la fin du cycle d'irrigation et sans labour.

Périmètre	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		M.O. (%)	CEe dS/m	ESP
	A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif			
Kalaât	32	27	23	18	0	38	15	1,2	4,5	14
Cebalat	27	34	22	13	1	47	23	0,7	5,3	14

A: Argile, Lf: Limon fin, Lg: Limon grossier, Sf: Sable fin, Sg: Sable grossier

M.O.: Teneur en matière organique

CEe: Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée du sol

ESP: Pourcentage de sodium échangeable

Tableau 2. Etats de surface des parcelles expérimentales de simulation. (moyenne de deux répétitions).

Périmètre / Irrigation	Sites	Occupation du sol	Pente (%)	Etat de surface (%)				
				Vég.	Bat.	Rec.	Nu	Fen.
Kalaât/	KL2 et KD3	Ch.+Pel. battance	1,1	9	85	2	4	0
Aspersion	KL3 et KD2	Labour	1,3	14	0	0	86	0
Cebalat/	CL3 et CF2	Ch.+Pel. battance	1,3	18	56	5	0	21
Submersion	CF3 et CL2	Labour	1,3	6	0	0	94	0

Ch.+Pel.battance: Chaume de maïs et pellicule de battance

Vég.: Végétation au sol

Bat.: Pellicule de battance

Fen.:Fentes

Rec.: Recouvrement sableux

Nu: Sol nu sans battance

Dans le sol de Cebalat et après un cycle d'une dizaine d'irrigations estivales par submersion, la structure de la surface du sol a évolué d'un état de labour rugueux vers un état massif à éléments structuraux polygonaux de l'ordre d'une dizaine de centimètres de côté. Ces éléments sont séparés par des fentes de l'ordre de 3 mm de large qui s'enfoncent à environ 10 cm. Ils sont arrondis au sommet et couverts par une fine pellicule de matière organique. L'état de surface engendré par les irrigations était à 56 % formé par une pellicule de battance et à 21 % par des fentes.

Les essais de simulation de pluie sont réalisés sur des parcelles échantillons de 1 m² soumises à trois séquences d'averses:

- séquence P1: présentant des averses de 20, 40 et 80 mm/h pendant 15 mn chacune;
- séquence P2: présentant des averses de 30 puis 60 mm/h pendant 20 puis 15 mn, P2 est réalisée 24 heures après P1;
- séquence P3: averse de 120 mm/h pendant 10 mn, 15 mn après P2.

Sur chacune de ces séquences, les variables suivantes sont déterminées:

- I mm/h: intensité de la pluie
- Pu mm: pluie utile = hauteur totale de l'averse
- Pi mm: pluie d'imbibition = Pu - Pe
- Pe mm: pluie efficace = hauteur de la pluie ayant effectivement donné lieu à du ruissellement
- Lr mm: lame ruisselée
- Kru (%): coefficient de ruissellement utile = $[(Lr+Dr)/Pu]*100$
- Kre (%): coefficient de ruissellement efficace = $[(Lr+Dr)/Pe]*100$
- E (g/m²): érodibilité ou détachabilité en g pour 1 m²
- Er (g/mm): érosivité d'un mm d'eau ruisselée = E/Lr
- Rx mm/h: intensité maximale de ruissellement
- Fn mm/h: infiltration minimale stabilisée = I-Rx
- W mm: lame infiltrée = Pu-Lr

Lors d'une averse, le sol s'humecte puis génère le ruissellement. La première fraction de la pluie est appelée pluie d'imbibition (Pi) et la seconde partie, qui ruisselle, est appelée pluie efficace (Pe). Ces événements dépendent de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. Sous l'impact des gouttes de pluie, la structure de la surface du sol se dégrade et se réorganise. Cet aspect est aussi fonction de l'intensité de la pluie et de l'état de surface du sol. Le coefficient de ruissellement (Kre) permet de distinguer les différences de comportement pendant la phase ruissellement.

Les essais de simulation de pluie sont également utilisés pour définir la conductivité hydraulique de sols saturés sous pluie (Casenave, 1982). L'intensité limite de ruissellement est un facteur caractéristique des réactions d'un sol à une précipitation. Elle est définie comme l'intensité de pluie au dessus de laquelle le sol présente un refus d'infiltration et un ruissellement peut apparaître. Elle est généralement évaluée par tâtonnements (Chevallier, 1982). Cette intensité limite varie en fonction de l'état hydrique du sol et se stabilise à saturation.

Pour définir l'infiltration maximale de ces sols sous conditions de saturation, on a procédé, à côté des essais de simulation, à des mesures de la vitesse d'infiltration par la méthode Müntz. La méthode sert d'habitude à cerner les paramètres d'irrigation aussi bien par submersion que par aspersion bien qu'elle ne soit pas normalement conçue pour cette méthode. La comparaison des conductivités hydrauliques à saturation (Ks), estimées par plusieurs méthodes, permet d'évaluer la validité de ces méthodes dans ce type de sol. Dans les mesures par la méthode Müntz, l'infiltration sous lame d'eau constante de 3 cm est suivie pendant 90 mn. Le ruissellement est nul or ce facteur peut modifier l'état de surface. D'autre part, les réactions de la surface du sol à l'impact des gouttes de pluie ne sont pas les mêmes que pour l'apport d'une épaisse lame d'eau (Floret et al., 1989).

Expérimentation

On a effectué deux tests avec deux répétitions par périmètre correspondant à deux états de surface sur lesquels se produisent les pluies précoces d'automne. Dans le premier cas, les pluies surviennent juste après la récolte d'une culture irriguée. Dans le deuxième cas, ces pluies se produisent sur un sol récemment labouré. Les sols des parcelles de Kalaât ont été préalablement cultivés en maïs irrigué par aspersion avec l'eau de la Mejerda. Ceux des parcelles de Cebalat ont été eux aussi cultivés en maïs mais irrigué par submersion avec l'eau usée traitée.

Pour évaluer l'effet des essais de simulation de pluie sur l'état salin du sol, des échantillons ont été prélevés dans la couche 0-20 cm. Ils ont servi à la détermination de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (CEe). Cinq échantillons par placette ont été réalisés avant et à la fin des

essais. Il faut signaler que les essais de simulation ont été conduits avec de l'eau du robinet ayant environ une conductivité électrique de 1 dS/m.

RESULTATS

1. Evolution sous pluies simulées

1.1. Efficacité du ruissellement

L'efficacité du ruissellement analysé par le coefficient de ruissellement (Kre) est abordée pour deux états hydriques et deux états de la surface du sol (Tableau 3).

Tableau 3. Ruissellement et érosivité des sols de Kalaât et de Cebalat en fonction de l'intensité de la pluie et l'occupation du sol. (Kre: coefficient de ruissellement efficace et Er: Erosivité)

Périmètre	Occupation du sol	Séquence	I(mm/h)	Kre(%)	Er(g/mm/m ²)		
Kalaât	Chaume + Pellicules de battance	P1	20	0	0		
			40	0	0		
			80	20	3,5		
		P2	30	10	1		
			60	26	2		
			120	61	4		
		Labour		P1	20	0	0
					40	0	0
					80	3	0
P2	30			3	0		
	60			3	0		
	120			11	4		
Cebalat	Chaume+Pellicules de battance			P1	20	0	0
					40	0	0
					80	15	3
		P2	30	19	4		
			60	44	4		
			120	51	9		
		Labour		P1	20	0	0
					40	0	0
					80	7	0
				P2	30	4	1
					60	6	2
					120	17	3

A Kalaât sur sol sec (séquence d'averses P1), le ruissellement est nul jusqu'à une intensité de 40 mm/h. Il ne devient effectif qu'à partir d'une intensité de 80 mm/h dans les parcelles labourées. Sur sol humide (séquence d'averses P2 intervenant après une séquence de pluies P1 conduite la veille), le ruissellement se produit même à une intensité de 30 mm/h pour une durée de l'averse de 15 mn. Ce ruissellement est environ 3 fois plus important quand le sol est humide que quand il est sec et 7 à 20 fois plus élevé sur un sol couvert par une pellicule de battance que sur un labouré. A Cebalat, le ruissellement est 2 à 5 fois plus élevé sur un sol couvert par une pellicule de battance que sur un sol labouré et 2 à 3 fois plus important sur un sol humide que sur un sol sec. Eu égard aux mesures réalisées à Kalaât et à Cebalat, le sol de Cebalat comportant des fentes en surface engendre un ruissellement d'environ 30 % inférieur à celui de Kalaât dépourvu de fentes. Par ailleurs, le sol humecté par l'averse P1 qui précède P2, produit toujours un ruissellement, même aux faibles intensités.

1.2. Evolution de l'érosivité des sols

Dans le cas où les averses sont conduites sur le sol sec de Kalaât, en fin de culture, couvert d'une pellicule de battance, l'érosion ne se manifeste qu'à partir d'une intensité de 80 mm/h. L'érosivité (détachabilité) du millimètre d'eau ruisselé est d'environ 3,5 g/mm/m² (Tableau 3). Si le sol est humide, cette érosion se produit avec une pluie de 30 mm/h. Dans ce cas, l'érosivité est d'environ 1 g/mm/m² pour une pluie de 30 mm/h et s'élève à 4 g/mm/m² quand la pluie est de 120 mm/h. Quand ces averses surviennent sur un labour, que le sol soit sec ou humide, l'érosion ne se manifeste que pour une intensité élevée, égale à 120 mm/h (Figure 2). L'érosivité est de même grandeur sur sol sec que sur sol humide. Elle est d'environ 4 g/mm/m² soit 0,04 t/ha par mm ruisselé. Dans le cas du sol sec de Cebalat, couvert par une pellicule de battance, l'érosion apparaît à partir d'une intensité de 80 mm/h. L'érosivité est d'environ 3 g/mm/m². Sur sol humide, l'érosivité est d'environ 4 g/mm/m² aussi bien pour 30 mm/h que pour 60 mm/h. Elle double pour une intensité de 120 mm/h. Si les averses sont appliquées à un sol labouré sec, l'érosion est pratiquement nulle jusqu'à une intensité de 80 mm/h. Si le sol est humide, elle se déclenche à partir de 30 mm/h (1 g/mm/m²) et triple à 120 mm/h.

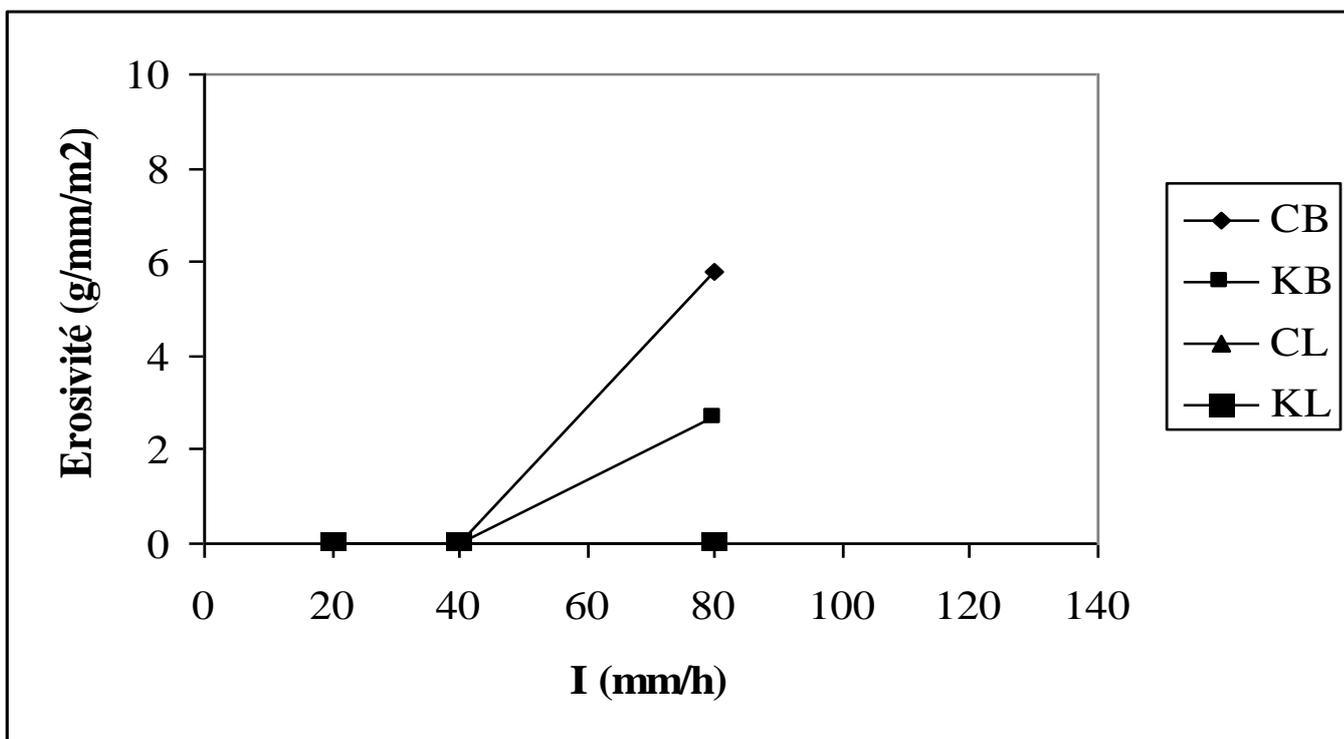
1.3. Aspects relatifs à lixiviation des sels

Les sols soumis aux essais de simulation avaient initialement, dans la couche 0-10 cm, une C_{Ee} d'environ 4,5 dS/m à Kalaât et environ 5,3 dS/m à Cebalat. A la fin des essais, ces valeurs étaient d'environ 2,2 à Kalaât et environ 3,1 dS/m à Cebalat. Cette lixiviation des sels est le résultat de la dissolution des accumulations salines et de l'entraînement des sels libres.

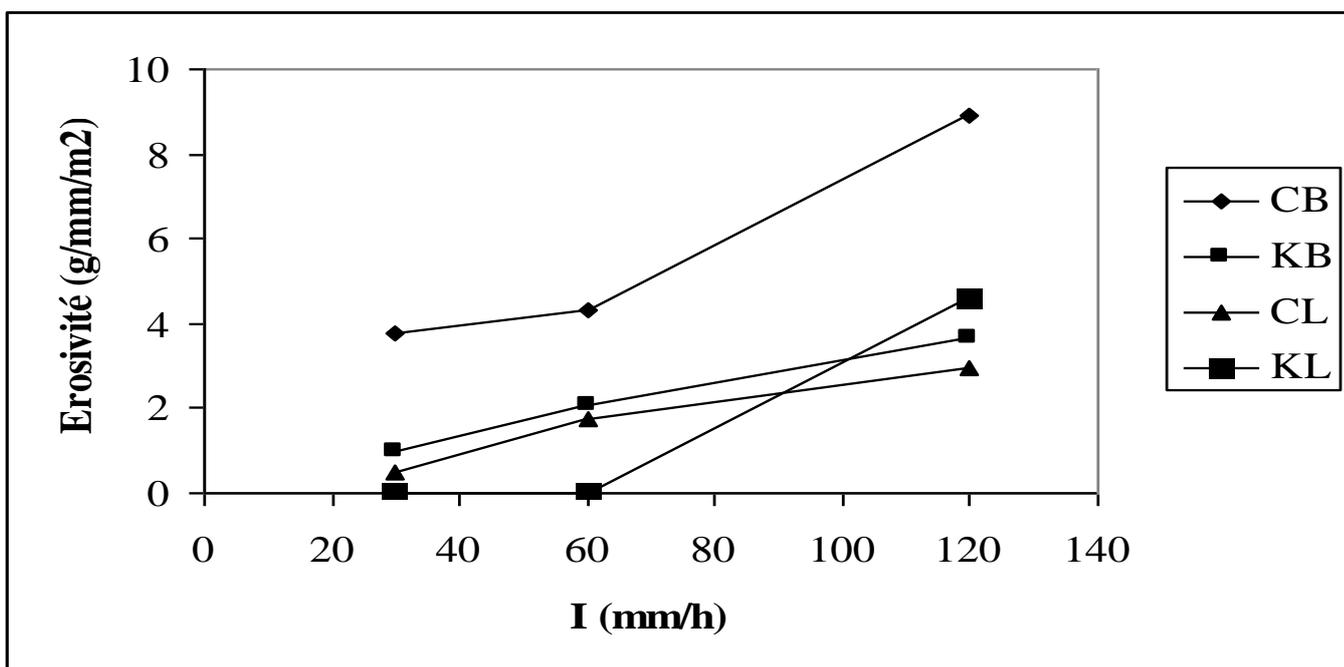
Dans les périmètres de Cebalat et Kalaât, les chlorures de sodium, en majorité des halites prédominent largement sur les autres types de sels. Comme ces sels sont très solubles et que la durée des mesures est suffisante pour les dissoudre, on peut considérer qu'une bonne infiltration est la condition sine qua non pour une bonne lixiviation des sels. Deux contraintes majeures s'opposent à cette hypothèse. D'abord, la tranche de sol humecté dans les essais de simulation est souvent une couche de surface alors que la lixiviation des sels concerne tout l'horizon. Ensuite, le ruissellement de surface contribue à emporter les sels accumulés en surface. Néanmoins, dans les conditions de Kalaât et Cebalat, le ruissellement est faible et local et la présence d'une nappe phréatique à moins de 1,60 m maintient le sol à une humidité élevée. Dans ces conditions, l'efficacité de la lixiviation des sels est très dépendante de l'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en eau du sol. En s'appuyant sur cette approximation (qui ne s'éloigne pas de la réalité), l'efficacité de l'infiltration et par conséquent celle de la lixiviation des sels diminue quand celle du ruissellement augmente et vice versa.

2. Evaluation de la conductivité hydraulique sur sol saturé à la fin de la simulation

Les conductivités hydrauliques saturées déterminées par le dispositif Müntz ou calculées par les pluies simulées ne sont pas directement comparables, puisqu'elles ne correspondent pas aux mêmes approches. Cependant, plusieurs auteurs ont tenté de faire la comparaison (Lafforgue et al., 1976; Valentin, 1985). Dans nos simulations de pluies, on aboutit à des intensités limites de ruissellement qui se rapprochent assez des conductivités hydrauliques saturées obtenues par la méthode Müntz (Tableau 4).



Sol sec



Sol humide

KALAAT:

KL: Kalaât - Labour

KB: Kalaât - Chaume et pellicule de battance

CEBALAT:

CL: Kalaât - Labour

CB: Kalaât - Chaume et pellicule de battance

Figure 2. Variation de l'érosivité en fonction de l'occupation du sol et de son état hydrique.

Tableau 4. Comparaison des conductivités hydrauliques saturées à partir des mesures Müntz (Km) et des valeurs d'intensité limite de ruissellement (II) (en mm/h).

Périmètre	Sites	Etat de surface après simulation	Km	II
				P3
Kalaât	KL2-KD3	Chaume+Pellicule de battance	24	15
	KL3-KD2	Labour+Pellicule de battance induite par les averses	102	107
Cebalat	CF2-CL3	Chaume+Pellicule de battance +fentes	74	58
	CF3-CL2	Labour+Pellicule de battance induite par les averses	528	109

* Les valeurs de Km proviennent de 4 répétitions.

- **Par le dispositif de Müntz:** A Kalaât, les mesures faites sous lame d'eau de 3 cm employant le dispositif de Müntz et réalisées à la fin des séquences de la simulation dans les parcelles labourées, aboutissent à des conductivités hydrauliques à saturation ($K_{sMüntz}$) de l'ordre de 102 mm/h, soit quatre fois plus élevées que dans les parcelles couvertes par des pellicules de battance où elle est de l'ordre de 24 mm/h (Tableau 4). A Cebalat, sur les labours qui ont subi les averses de la simulation, $K_{sMüntz}$ est de 528 mm/h. Pour les parcelles à la fois couvertes par une pellicule de battance et fissurées, $K_{sMüntz}$ n'est que de 74 mm/h.

- **Par les intensités limites des simulations de pluie:** Valentin (1985) considère que l'intensité limite de ruissellement (II) de la dernière séquence pluvieuse peut être assimilée à la conductivité hydraulique saturée. A Kalaât, la valeur de II de la dernière séquence pluvieuse P3 est d'environ 107 mm/h pour les parcelles labourées et 15 mm/h pour celles couvertes par une pellicule de battance. A Cebalat, la valeur de II de P3 est d'environ 109 mm/h pour les parcelles labourées et 58 mm/h pour celles couvertes par une pellicule de battance et fissurées.

Mise à part la valeur élevée de $K_{sMüntz}$ dans le cas du labour à Cebalat et compte tenu de la forte variabilité de la perméabilité, l'écart des résultats est inférieur à 37 %. Les approches très différentes ne conduisent pas à des résultats similaires. Si on peut admettre les intensités d'infiltration mesurées par la méthode de Müntz et réalisées en condition de saturation maximale pour estimer les doses d'irrigation par submersion, il est par contre plus exact de se baser sur les essais de simulation de pluies pour concevoir les irrigations par aspersion qui sont mieux reproduites par ces essais. En effet, l'eau est rapportée gravitairement dans la submersion alors qu'il est projeté sur le sol sur une certaine distance par aspersion.

Discussion et conclusion

Lors des averses, les sols argilo-limoneux des périmètres irrigués de la Basse Vallée de la Mejerda s'humectent avant de générer le ruissellement. Cette humectation et ce ruissellement dépendent de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. La réorganisation de la surface sous l'impact des gouttes de pluie est plus importante pour le labour et se traduit par la diminution de l'infiltration au cours des averses successives. L'état de surface tend alors à se rapprocher de celui du sol nu battant non labouré. Les pluies d'intensités faibles s'infiltreront plus qu'elles ne donnent lieu à un ruissellement car elles ne modifient que faiblement l'organisation structurale de la surface du sol, contrairement aux pluies d'intensités élevées. Le ruissellement se déclenche à des moments différents suivant les états de surface. La cohésion des agrégats sur sol sec battant ralentit leur mobilisation. Après humidification, la mobilisation d'éléments fins désagrégés par les pluies précédentes est rapide. Les fentes qui apparaissent sur alluvions argileuses ne se referment qu'après un certain temps et allongent par conséquent la durée d'imbibition. Sur labour, la désagrégation des agrégats est très différente suivant leur état d'hydratation initial. Lorsque les agrégats sont secs, la désagrégation est plus importante et un excès d'eau apparaît rapidement en surface. En revanche, lorsqu'ils sont saturés, la croûte se forme lentement et l'infiltrabilité reste élevée. Ainsi, une averse de 30 mm/h sur

sol déjà humide apparaît dans certaines parcelles, plus érosive qu'une averse de 60 mm/h sur sol sec. En fait, dans une séquence de simulation de pluie donnée, les averses de faibles intensités qui précèdent une averse plus intense, commencent par humecter les agrégats qui éclatent progressivement. Les éléments fins déliés de leur squelette sont ainsi disponibles à l'entraînement et au transfert horizontal, ce que l'intensité des pluies qui succèdent se charge de faire. Ce raisonnement s'applique également à l'enchaînement des séquences P1, et P2 et P3 réalisé après 24 heures de ressuyage. Il serait donc hasardeux de voir chaque résultat obtenu en dehors du protocole expérimental. Au cours de chaque averse et aussi au cours de la même averse, les organisations superficielles subissent des modifications morphologiques et physico-hydriques et les couches sous-jacentes se saturent en eau. Cet enchaînement d'événements se traduit par des comportements mécaniques et hydriques en constante évolution.

L'infiltration des pluies est fortement augmentée par des façons culturales qui préparent les sols à mieux infiltrer l'eau et qui sont ainsi moins affectés par le ruissellement et par l'érosion. L'irrigation par aspersion apparaît moins favorable à l'infiltration. Cependant, cet inconvénient disparaît complètement après un labour. Ainsi, le comportement du sol à la fin d'un cycle d'irrigation est nettement différent entre Cebalat où l'irrigation se fait par submersion et Kalaât où l'irrigation se fait par aspersion. Cette différence n'est plus significative après un labour. Cette efficacité des pluies joue positivement sur l'entraînement des sels. Il s'ensuit que la mise en valeur des sols salés de la région doit intégrer judicieusement l'apport favorable des pluies en favorisant l'infiltration.

Le mode d'irrigation génère une réorganisation superficielle du sol. L'irrigation par aspersion produit des pellicules de battance favorables à la formation de flaques et au ruissellement. Le travail du sol et en particulier le labour après la récolte de la culture estivale, est une mesure anti-érosive efficace pour la lixiviation des sels. Cependant, après les premières averses d'automne, le sol humecté devient boueux et un nouvel obstacle à l'infiltration réapparaît.

Par ailleurs, les organisations pelliculaires de surface (O.P.S) réduisent les pertes d'eau par évaporation. Le tassement de l'horizon travaillé et son assèchement conduisent à une "auto-protection" qui ralentit la remontée des sels. La présence d'O.P.S limite considérablement l'entraînement des sels vers les drains.

A la limite, on peut concevoir l'efficacité de la lixiviation des sels qui serait inversement proportionnelle au coefficient du ruissellement efficace K_r . Ainsi, sur sol humide, l'efficacité de la lixiviation des sels diminue d'environ 10 à 30 %, toute chose étant par ailleurs égale.

Réalisées à la fin des simulations de pluies, nos observations ont permis de noter que les microhorizons apparaissent réduits à un premier niveau de 1 mm environ à dominance de limons suivi d'un second niveau plus épais formé de matériaux compacts. Ces deux niveaux forment une croûte qui se distingue du microhorizon sous-jacent dont elle est séparée par de gros pores. Des agrégats, formés au cours du labour, restent identifiables. Ces organisations s'apparentent à celles générées sous irrigation par aspersion. D'ailleurs, plusieurs auteurs ont employé cette technique pour le choix des asperseurs adéquats (Valentin et Ruiz Figueroa, 1987). Au cours d'un itinéraire d'irrigation, les organisations qui résultent de l'une des deux méthodes d'irrigation sont détruites par le labour. Ce dernier a pour effet de bouleverser la structure de l'horizon de surface. Le labour, suivi des pluies et de la dessiccation, s'accompagne de la formation d'une organisation de surface dont la porosité est nettement plus réduite que l'organisation initiale. En ce qui concerne le comportement hydrodynamique et la conséquence sur la lixiviation des sels, on constate que:

- l'horizon à gros pores situé sous l'organisation de surface à pores plus fins stoppe momentanément la progression du front. L'eau s'accumule à la base du matériau à pores fins

jusqu'à ce que le potentiel soit devenu suffisamment bas pour permettre l'entrée de l'eau dans l'horizon suivant (Hillel et Garder, 1969).

- au cours des irrigations, le microhorizon peu perméable en surface expose plus l'eau à l'ensoleillement et à l'évaporation. A la fin des irrigations, cet obstacle hydraulique protège le sol du dessèchement. Le flux ascendant des sels depuis la nappe phréatique superficielle salée se trouve ainsi réduit.
- les organisations de surface qui résultent de l'aspersion limitent l'infiltration. La parcelle irriguée par submersion présente une conductivité hydraulique saturée (74 mm/h) à peu près triple de celle générée par aspersion (24 mm/h). Il faut aussi noter l'effet des fentes qui restent ouvertes sous submersion et disparaissent sous aspersion.

Le mode d'irrigation conduit donc la surface du sol irrigué à deux états différents. Les fissures, présentes ordinairement dans les sols irrigués par submersion, n'existent plus après aspersion. La nature des organisations superficielles, liées au mode d'irrigation (aspersion et submersion), entraîne donc un comportement différent des sols vis à vis de l'eau, des solutés et de la détachabilité des matériaux.

Ainsi, les sols limono-argileux et salins du périmètre de Kalaât et Cebalat subissent, entre l'automne et l'été, l'impact des pluies qui permettent une certaine lixiviation des sels et une réorganisation de leur surface. Dans ce contexte, la désalinisation des sols et leur réhabilitation peuvent être rendues plus rapides et moins coûteuses si la gestion des sols et des eaux tient plus compte du régime des pluies. L'amélioration des propriétés hydrodynamiques, en particulier la conductivité hydraulique à saturation, est un préalable à leur récupération. Son estimation permet d'ajuster la gestion des eaux d'irrigation et la conception du drainage des terres. Les données de l'essai de simulation de pluie permettent de mieux caler les caractéristiques des asperseurs employés dans l'irrigation.

BIBLIOGRAPHIE

Asseline J., Escadafal R., Mtimet A., 1989.- Infiltromètre à aspersion - Dépouillement des données de terrain par micro-ordinateur (1985). Sols de Tunisie n°14. pp. 133-158.

Casenave A., 1982.- Le mini-simulateur de pluie: conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., Vol.XIX, n°4: 207-228.

Chevallier P., 1982.- Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., Vol.XIX, n°4: 253-297.

Escadafal R., 1989.- Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie) - Collection Etudes et thèses. Edition ORSTOM. Paris, 317 p.

Floret Ch., Mtimet A., Pontanier R., 1989.- Caractérisation écologique des régimes hydriques et de l'érodibilité des sols en zone aride. Sols de Tunisie n°14. pp. 63-109.

Hillel D., Gardner W.-R., 1969.- Steady infiltration into crust topped profiles. Soil Sc., 108: 137-142.

Hillel D., 1988.- L'eau et le sol: principes et processus physiques. Ed. Academia. Louvain-La-Neuve Belgique, 294 p.

Lafforgue A., Naah E., 1976.- Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 13 (3): 115-237.

Mc Intyre D.-S., 1958.- Permeability measurements of soil crusts formed by impact. *Soil Sci.*, 85: 185-189.

Qadir M. and Schubert S., 2002. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degradation Development* 13: 275-294.

Sumner M.E., 1993.- Sodic soils: new perspectives. *Aust. J. Soil Res.*, 31 pp. 683-750.

Valentin C., 1985.- Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Edit. ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris. 253 p.

Valentin C. et Ruiz Figueroa J., 1987.- Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In *Micromorphologie des sols/Soil Micromorphology*. Edit. AFES (Plaisir, France): 401-408.