

ES 288

REPUBLIQUE TUNISIENNE  
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE  
DIRECTION DES SOLS



## **comportement de sols argileux irrigués sous pluies simulées**

**rôles des organisations superficielles  
pour le lessivage des sols et leur érodibilité  
dans le choix du mode d'irrigation**

M. Hachicha, R. Pontanier et B. Dridi

1996

Ministère de l'Agriculture  
DIRECTION DES SOLS

**Comportement de sols argileux irrigués  
sous pluies simulées**

**Rôles des organisations superficielles  
pour le lessivage des sols et leur érodibilité  
dans le choix du mode d'irrigation**

**HACHICHA M., PONTANIER R.  
et DRIDI B.**

**Février 1996**

**Comportement de sols argileux irrigués**  
**sous pluies simulées**  
**Rôles des organisations superficielles**  
**pour le lessivage des sols et leur érodibilité**  
**dans le choix du mode d'irrigation**

**RESUME**

Les simulations de pluies ont été menées sur des parcelles labourées et d'autres non labourées 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 des organisations superficielles. Les fissures présentes ordinairement dans ces sols disparaissent sous leur obstacle. A Cebalat, la submersion conserve les fissures. Les pellicules de battance qui apparaissent n'empêchent pas la dessiccation du sol.

Les pluies automnales s'expriment par une bonne infiltration et par conséquent par un meilleur lessivage 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 qui 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 donnent lieu à des organisations pelliculaires 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. Il s'agit de la nature des organisations superficielles et du comportement des sols vis à vis de l'eau, des solutés et de la détachabilité des matériaux.

La simulation de pluies apparaît d'un grand intérêt pour l'étude de l'évolution de la salure des sols sous différents régimes hydriques et modes de gestion.

## SOMMAIRE

	<b>Pages</b>
<b>RESUME</b>	
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1. Rappels sur les organisations pelliculaires superficielles des sols de région aride et leur fonctionnement hydrodynamique</b>	
1.1. Formation et évolution des organisations pelliculaires superficielles (O.P.S).	1
1.2. Fonctionnement hydrodynamique des O.P.S.	2
<b>2. MATERIELS ET METHODES</b>	
2.1. Le milieu physique	2
2.2. La simulation de pluie	4
2.3. Les parcelles d'essais	4
2.4. Mesure de la conductivité hydraulique des sols à l'état saturé	5
<b>3. RESULTATS</b>	
3.1. Caractérisation des états de surface	
3.1.1. Les sols de Cebalat	5
3.1.2. Les sols de Kalaât Landelous	5
3.2. Evolution sous pluies simulées	6
3.2.1. Efficacité du ruissellement	6
3.2.2. Dégradation de la structure des sols	9
3.2.3. Quelques aspects relatifs au lessivage des sels	12
3.3. Evaluation de la conductivité hydraulique sur sols saturés	16
3.4. Conséquences sur le mode d'irrigation	18
<b>CONCLUSION</b>	<b>19</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>21</b>

Le rôle de la pluie dans la désalinisation des sols est généralement mis en évidence par l'étude des profils salins et l'évaluation du bilan des sels après les événements pluvieux (CRUESI, 1970; Durand, 1983; Hachicha, 1990). Plusieurs facteurs interviennent pour améliorer ou ralentir l'efficacité du lessivage (Job, 1992). Mais l'état de la surface des sols et l'intensité des pluies ont été rarement pris en considération. La caractérisation morphologique et analytique des profils pédologiques peut permettre de mettre en avant quelques indices explicatifs du comportement des sols vis à vis de l'eau. Mais cette approche n'est pas du tout suffisante dans les milieux pour lesquels les organisations superficielles jouent un rôle déterminant dans le régime hydrique des sols.

La simulation de pluie développée en Tunisie depuis 1986, a été principalement mise en oeuvre pour l'étude de l'érodibilité des sols cultivés et des milieux naturels en région aride (Sols de Tunisie n°14), ainsi que celle de l'infiltrabilité des sols soumis à des averses contrôlées. Si de nombreuses situations ont été testées (220 parcelles représentant près de 2000 averses (données de Chnina, 1991; référentiel des simulations en cours) sur l'ensemble du territoire tunisien, les sols argileux salsodiques des plaines alluviales soumis à des irrigations régulières, n'ont jamais fait l'objet de telles études, malgré une tentative sur des sols gypso-sableux salés du Sud du pays à El Guettar (Job, 1992). Ces sols très répandus au Nord de la Tunisie, constituent la majorité des terres des grands périmètres irrigués. Ils possèdent des comportements fort complexes tant sur le plan chimique, physique qu'hydrique.

Dans ces milieux hydro-pédologiquement complexes, ce travail constitue une tentative pour examiner dans quelle mesure, l'effet des pluies peut modifier les propriétés superficielles des sols qui suite aux irrigations par submersion, tendent à la longue à s'encroûter. Les essais réalisés en automne sur des parcelles irriguées à l'eau saumâtre durant tout l'été permettent de simuler l'effet des pluies automnales sur ces sols en fonction des différentes pratiques agricoles. Nous en déduisons les conséquences sur le choix du mode d'irrigation.

## **1. Rappels sur les organisations pelliculaires superficielles des sols de région aride et leur fonctionnement hydrodynamique.**

### **1.1. Formation et évolution des organisations pelliculaires superficielles (O.P.S):**

En Tunisie, la battance des sols est un aspect fréquemment observée dans les sols limoneux irrigués. Floret et al. (1976) et Roose et al. (1990) constatent 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 celle du lessivage des sels. 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.a; Mtimet, 1983). Les matériaux arrachés (généralement du loess saharien) sont redistribués sur place formant un mince film d'épaisseur inférieure à 1 mm, auquel Escadafal (1981; 1989) propose le terme de "pellicule de battance" (structural crusts) par opposition aux croûtes de battance (depositional crusts) qui se forment par l'entraînement des matériaux vers les microdépressions en constituant des dépôts de plusieurs millimètres lités. Souvent lors du dessèchement, ces croûtes se craquent en fragments convexes sous l'effet de tensions internes.

Valentin (1985) définit des niveaux d'organisations des pellicules superficielles (O.P.S) à la fois par leur structure lamellaire et leur cohésion. Il observe des différenciations de microhorizons de nature granulométrique distincts. La porosité de certains microhorizons et notamment de ceux à dominance plasmique pouvait être très réduite, ou se limiter à des vésicules non fonctionnelles vis à vis de l'infiltration. La formation et l'évolution des O.P.S commence par un début d'éclaircissement du fond matriciel et un début de distribution rubanée du squelette (Valentin, 1985). A ceci succède la fragmentation des agrégats les plus petits, le rejaillissement sous l'impact des gouttes de pluie et le comblement des macropores inter-agrégats et des micro-dépressions; les sables prennent un aspect "lavé". Comme l'intensité d'infiltration devient inférieure à l'intensité de la pluie, des petites plaques commencent à se former auxquelles correspondent les premiers dépôts laminaires. Apparaît alors le ruissellement, l'argile est entraînée latéralement, formation de vésicules. Le microrelief de la parcelle conditionne localement l'épaisseur de la lame d'eau et intervient considérablement dans la formation des O.P.S. Quand la pluie cesse, deux microhorizons se distinguent: le premier dense dont les particules ont subi un tri granulométrique et sont orientées parallèlement à la surface, et le second hétérométrique dont les particules apparaissent désordonnées et déliées, à la surface des zones d'écoulement. Sur les parcelles labourées formées d'alluvions argileuses, la genèse des O.P.S est en particulier le résultat d'une désagrégation et de dépôt de flux laminaires et de flux turbulents.

## 1.2. Fonctionnement hydrodynamique des O.P.S:

Les O.P.S correspondent à des différenciations morphologiques de la surface du sol. Elles présentent également des comportements: mécanique, vis à vis du cycle de l'eau et vis à vis de l'érodibilité, différents des matériaux sous-jacents. Elles se définissent à la fois par leur structure lamellaire et leur cohésion (Valentin, 1985). Pour caractériser l'intervention des O.P.S sur le cycle de l'eau, il emploie différentes approches de la conductivité hydraulique saturée ( $K_s$ ), d'abord l'évaluation de la résistance hydraulique des O.P.S à partir de l'analyse de leur espace poral puis les mesures sous lame d'eau. Selon lui, l'intensité limite de ruissellement est égale à la conductivité hydraulique saturée du modèle de Green et Ampt (1911).

Les manques à la levée du semis occasionnés par la présence d'une pellicule ou croûte sur un sol "battant" sont un paramètre très important qui intervient négativement dans l'élaboration du rendement (Boiffin et Scbillote, 1976)

Les croûtes possèdent de faibles conductivités hydrauliques qui peuvent être plusieurs fois inférieures à celles du sol sous-jacent (Riou, 1966). La croûte superficielle agit comme une barrière hydraulique (Hillel, 1988). Cette discontinuité de porosité peut également protéger le sol de l'évaporation (Bresler et Kemper, 1970).

De nombreux facteurs conditionnent la conductivité hydraulique saturée: la granulométrie qui intervient elle-même sur la distribution de la taille des pores; les racines et la faune du sol; l'instabilité structurale et le taux de salinité. Selon Quirk et al. (1955), 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 (Shainberg, 1984).

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 (Henin et al., 1969). La dispersion constitue une des propriétés des argiles sodiques. Les agrégats paraissent alors "fondre" et la masse du sol se compacte (Roose, 1980). La baisse de la perméabilité résulte d'une obstruction partielle ou totale des pores induite par le gonflement ou la défloculation et la dispersion des particules d'argile (Quirk et al., 1955). Sur sols limoneux, Roose et al. (1990) constate qu'à l'échelle du  $m^2$ , la simulation de pluies permet de bien observer la dynamique de l'infiltration.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. Le milieu physique

Les périmètres de Kalaât Landelous et de Cebalat Borj-Touil se situent dans la basse vallée de la Mejerda (Fig.1). La région présente un climat méditerranéen semi-aride supérieur. La pluviométrie moyenne annuelle est de 470 mm. Le déficit hydrique climatique annuel est d'environ 900 mm. Cette plaine alluviale côtière gagnée sur la mer, est caractérisée par une altitude comprise entre 3 et 5 m. 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. L'aménagement hydro-agricole du périmètre de Kalaât Landelous a été entrepris en 1986. Le périmètre qui couvre 2800 ha comprend un réseau de drainage constitué de drains enterrés, de collecteurs à ciel ouvert, de deux émissaires principaux et d'une station de pompage qui refoule l'eau vers la mer (Hachicha et al., 1993). Chaque unité élémentaire de 5 ha est desservie par une borne d'irrigation. L'eau de qualité variable, provient de l'Oued Mejerda. Elle titre en moyenne 2,6 g/l. Pour irriguer ces terres, l'aspersion a été retenue comme mode d'irrigation malgré la salinité élevée des eaux. Dans ce périmètre, on prévoit de produire des cultures maraîchères et fourragères d'été et compléter les besoins en eaux des céréales en hiver. La caractérisation hydro-pédologique du périmètre a fait l'objet de plusieurs travaux (Bach Hamba, 1992; Bouksila, 1992; Hachicha et al., 1993).

Le périmètre de Cebalat Borj Touil couvre environ 3000 ha. Assaini et drainé à partir de 1982, l'irrigation a démarré en 1989. L'aménagement a consisté en la réalisation de collecteurs à ciel ouvert et de drains enterrés dans certains secteurs (Hachicha et al., 1990; Hachicha et al., 1992.). Les sols assez semblables à ceux de Kalaât, de même pour la gestion des eaux sauf qu'il s'agit d'une eau usée épurée traitée à la station de la Choutrana. Elle reste relativement chargée, près de 3,5 g/l. L'aspersion et la submersion sont les deux modes adoptés pour l'irrigation de ces terres pour produire des cultures fourragères et du coton.

### Les périmètres de la Basse Vallée de la Mejerda

- |                   |                  |                 |
|-------------------|------------------|-----------------|
| 1. Borj El Amri   | 2. Borj Toumi    | 3. Chouigui     |
| 4. Zouitna N.     | 5. Tébourba      | 6. Méhrine Nord |
| 7. Zouitna S.     | 8. Sidi Néji O.  | 9. Méhrine Sud  |
| 10. Sidi Néji Est | 11. Bir Aouini   | 12. Bathan      |
| 13. Mansoura      | 14. Kechba       | 15. Khélij      |
| 16. Néfissa       | 17. Hammada      | 18. Habibia     |
| 19. Daouar Bey    | 20. Mornaguia    | 21. Gantoura    |
| 22. Chougafa      | 23. Chaouât      | 24. Djédeida    |
| 25. Béjaoua       | 26. Oued Ellil   | 27. Manouba     |
| 28. Zahroumi      | 29. Lezdine      | 30. Dj. Ammar   |
| 31. Sidi Thabet   | 32. Cherfech     | 33. Cebalat     |
| 34. Utique Nlle   | 35. Kt Landelous |                 |

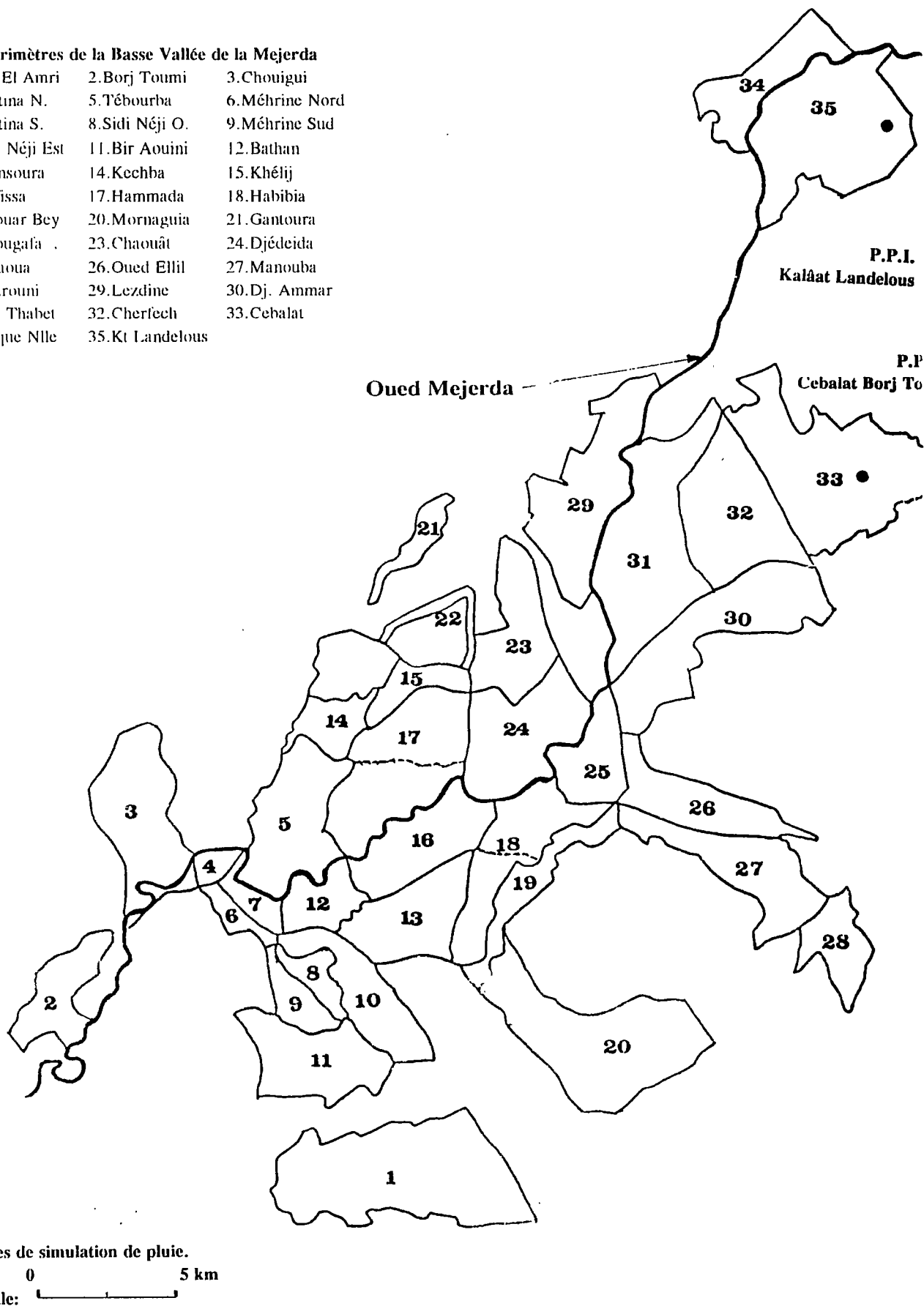


Figure 1. Les parcelles de simulation dans les périmètres de Kalâat Landelous et Cebalat Borj Touil.

## 2.2. La simulation de pluie

Il s'agit de produire à partir d'un infiltromètre à aspersion (Asseline et al., 1989), un flux de gouttes d'eau de taille et d'énergie cinétique comparable à celui des gouttes de pluies naturelles (Mtimet, 1987; Floret et al., 1989). Par la maîtrise de l'intensité, de la hauteur et de la durée de ces flux, on obtient facilement des valeurs de ruissellement, d'infiltration et d'érodibilité (Bahri et al., 1989). La méthode consiste en la description de l'occupation des terres, la caractérisation des états de surface par la méthode des points quadrats, la mesure de l'infiltration et du ruissellement par des averses simulées et le dépouillement des résultats par l'emploi de programmes informatiques (Asseline et al., 1989 et Martini et al., 1991). Ces essais de simulation de pluie permettent de tester l'infiltration, la sensibilité à l'érosion et l'effet de la gestion du sol sur des parcelles échantillons de 1 m<sup>2</sup> soumises à des pluies d'intensités faibles, moyennes et fortes. On définit ainsi certaines variables dont:

- I mm/h: intensité de la pluie
- Pu mm: pluie utile = hauteur totale de l'averse
- Pi mm: pluie d'inhibition = Pu - Pe
- Pe mm: pluie efficace = hauteur de la pluie ayant effectivement donné lieu à du ruissellement
- Lr mm: lame ruisselée
- Kru (%): coeff. de ruissellement utile = [(Lr+Dr)/Pu]\*100
- Kre (%): coeff. de ruissellement efficace = [(Lr+Dr)/Pe]\*100
- E (g/m<sup>2</sup>): érodibilité ou détachabilité en g pour 1 m<sup>2</sup>
- 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

Trois séquences d'averses ont été testées:

- 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 juste 15 mn après P2.

## 2.3. Les parcelles d'essais

Nous avons effectué deux tests à 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 Landelous ont été cultivés en maïs qui a été irrigué par aspersion par les eaux de la Mejerda titrant 2,6 g/l (Tableau 1). Les sols des parcelles de Cebalat diffèrent par la nature des eaux d'irrigation et leur mode d'application. Il s'agit d'eaux usées épurées gérées par submersion. Ces eaux titrent en moyenne 3,5 g/l.

Tableau 1. Qualité des eaux d'irrigation (9/1991).

Paramètre	Kalâat	Cebalat
CEe (mS/cm)	3,8	5,0
Résidu Sec (g/l)	2,6	3,5
pH	8,0	8,1
Na+ (mé/l)	24,78	44,35
Ca <sup>2+</sup> (mé/l)	7,98	15,96
Mg <sup>2+</sup> (mé/l)	5,58	9,05
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mé/l)	2,79	4,43
Cl <sup>-</sup> (mé/l)	22,54	50,14
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mé/l)	13,71	13,75



## 2.4. Mesure de la conductivité hydraulique des sols à l'état saturé

Casenave (1982) propose la simulation des pluies pour l'étude au champ des lois d'infiltration et aussi pour l'étude des relations entre état de surface des sols et infiltration. L'intensité limite de ruissellement, un des facteurs caractéristiques des réactions d'un sol à une précipitation, permet d'estimer la capacité d'absorption des sols. Elle est généralement évaluée par tâtonnements (Chevallier, 1982). C'est une intensité limite de précipitation au dessus de laquelle la parcelle ruisselle de façon stable. Cette intensité limite varie en fonction de l'état hydrique du sol et se stabilise à la saturation.

Pour définir l'infiltration maximale de ces sols sous conditions de saturation, nous avons procédé à côté des essais de simulation, à des mesures de la vitesse d'infiltration par la méthode Müntz (Colombani et al., 1972). L'infiltration sous lame d'eau constante de 3 cm est suivie pendant 90 mn. La méthode sert d'habitude à cerner les paramètres d'irrigation. Dans ces mesures, 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).

Pour les trois averses préconisées dans les simulations, nous avons estimé les intensités limites correspondantes et calculé les conductivités hydrauliques saturées par le modèle de Green et Ampt (1911). Puis, nous avons procédé à une comparaison des valeurs de  $K_s$ .

## 3. RESULTATS

### 3.1. Caractérisation des états de surface

#### 3.1.1. Les sols de Cebalat

Après une dizaine d'irrigations par submersion à l'eau usée épurée et salée, la structure de la surface du sol, de texture limono-argileuse fine, a évolué d'un labour rugueux vers un épipédon massif à éléments texturaux polygonaux de l'ordre d'une dizaine de centimètres de côtés. 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 couche de matière organique qui provient des matériaux en suspension contenues dans les eaux. Dans deux parcelles, cet état a été préservé alors que dans deux autres un labour à la charrue à disque profond d'une vingtaine de centimètres a été effectué. Au cours de l'été, les irrigations ont produit une homogénéisation de la salure en surface qui s'est stabilisée à 4,9 mS/cm. L'ESP (Exchangeable Sodium Percent) est égale à 14 (Tableau 2). L'état de surface engendré par les irrigations est formé à moitié par des pellicules de battance, 25% par de fissures et le reste constitué essentiellement de chaumes et d'halophytes (Tableau 3). Une fois labouré, la surface devient nue sans contrainte à l'infiltration. La rugosité est de l'ordre de 5% pour les sols nus et entre 5 et 20% pour les parcelles labourées.

#### 3.1.2. Les sols de Kalaât Landelous

Ils sont légèrement plus argileux et moins limoneux que ceux de Cebalat. Leur irrigation par aspersion conduit à la formation de pellicules de battance qui atteignent 76,5 à 93,4% des états de surface. Cet état disparaît par le labour mais réapparaît à la perte de cohésion sous l'effet des gouttes d'eau. Les sols sont assez salés, de l'ordre de 2,9 mS/cm, assez sodiques, ESP égale à 14. En plus, ils sont pauvres en matière organique, moins de 1%. La rugosité est comprise entre 1 et 6% pour les parcelles labourées et 2 et 16% pour celles couvertes par des pellicules de battance. Elle est sans effet notable sur les paramètres de la simulation.

Tableau 2. Caractérisation Pédologique de la surface des parcelles (0-10 cm)

Périmètre	Granulométrie (%)					Calcaire		Mat. Org. (%)	CE mS/cm	ESP
	A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif			
Cebalat	27	34	22	13	1	38	15	1,2	4,9	14
Kalaât	32	27	23	18	0	47	23	0,7	2,9	14

Tableau 3. Etats de surface des parcelles de simulation (Simulations réalisées entre le 28/9 et 2/10/92).

Périmètre	Site	Occupation du sol	Pente (%)	Etat de surface(%)				
				Vég.	Bat.	Rec.	Nu	fen.
Kalaât	KL2	Chaume maïs+Pell. de battance	0,7	16,3	76,5	4,4	2,8	0,0
	KD3	Chaume maïs+Pell. de battance	1,5	1,1	93,4	0,0	5,3	0,0
	KL3	Labour à disque sens contre pente	1,5	9,4	0,0	0,0	90,6	0,0
	KD2	Labour à disque sens pente	1,2	19,4	0,3	0,0	80,3	0,0
Cebalat	CL3	Chaume maïs+Pell. de battance	1,0	14,1	62,3	0,0	0,8	23,2
	CF2	Chaume maïs+Pell. de battance	1,5	21,3	48,5	9,7	0,0	18,6
	CF3	Labour à disque sens contre pente	1,0	0,6	0,0	0,0	99,4	0,0
	CL2	Labour à disque sens pente	1,5	12,2	2,0	0,0	85,9	0,0

Vég.:végétation au sol; Bat.:pellicule de battance; Fen.:Fentes  
Rec.:recouvrement sableux; Nu:sol nu sans battance.

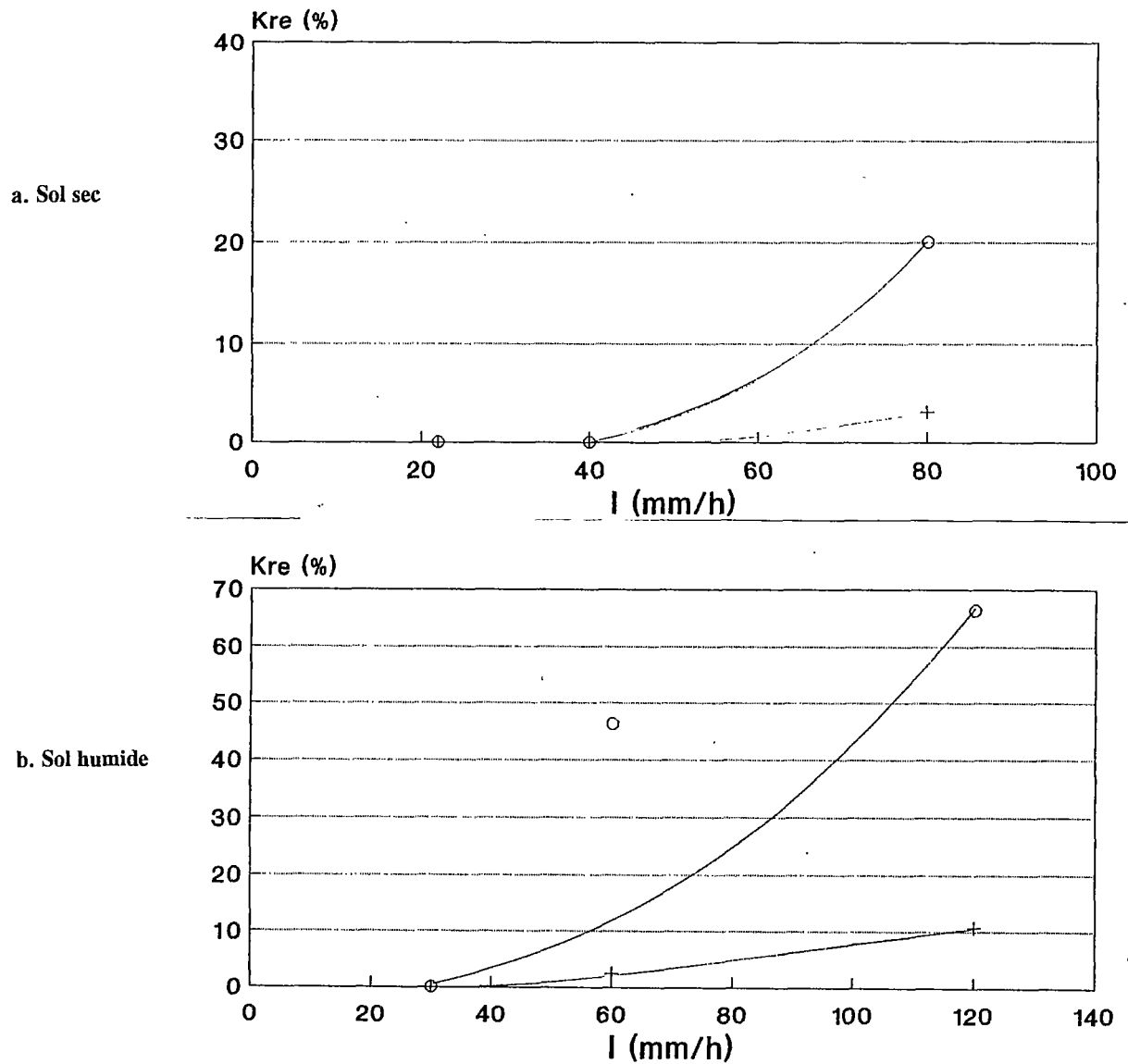
### 3.2. Evolution sous pluies simulées

Lors d'une averse, le sol s'humecte avant de générer le ruissellement. La première fraction est appelée pluie d'imbibition (Pi) et la seconde partie pluie efficace (Pe). Ces événements sont fonction 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 et la structure de la surface du sol contrairement aux pluies d'intensités élevées. Le ruissellement se déclenche à des moments différents suivant les états de surface. Le coefficient de ruissellement (Kre) permet de distinguer les différences de comportement pendant cette phase. Le sol humecté par l'averse P1 qui précède P2, produit toujours un ruissellement même aux faibles intensités.

#### 3.2.1. Efficacité du ruissellement

Les essais de simulation sont survenus sur des sols moyennement humides environ un mois après l'arrêt des irrigations. A Cebalat, l'humidité pondérale  $\Theta_s$  était de l'ordre de 18% en surface et 23% vers 100 cm de profondeur. L'état hydrique était légèrement différent à Kalaât,  $\Theta_s$  d'environ 17,5% en surface, s'élève à 20% puis 26,5% successivement à 10 cm et 100 cm de profondeur.

Le ruissellement ne devient effectif sur un sol non saturé qu'à partir d'une intensité comprise entre 60 et 80 mm/h dans les parcelles labourées mais il se déclenche à partir de 40 mm/h quand le sol est couvert par des pellicules de battance (chaume; Fig.2a). L'averse P2 qui intervient après une séquence de pluies P1 survenue la veille produit un ruissellement même aux faibles intensités résultat de la perte de cohésion des agrégats humides et du colmatage de la macroporosité (Fig.2b). La mobilisation d'éléments fins désagrégés par les pluies précédentes est rapide sur sol humide (Escadafal et al., 1986). Sur sol sec, la cohésion des agrégats ralentit leur mobilisation. L'appauvrissement de la surface en argile est accompagné d'un enrichissement en limons et en sables. Le sol battant de Kalaât infiltre à l'état sec toute l'eau jusqu'à 40 mm/h. Après humectation, il provoque le ruissellement même à 30 mm/h, ce qui explique la présence de flaques induites par les asperseurs lors des irrigations.



+: Labour (moyenne KD2 et KL3)  
o: Chaume (sol battant; moyenne KD3 etKL2)

Figure 2. Variation du ruissellement - Kalaât Landelous.

Le sol de Cebalat dont la pellicule de battance comporte des fentes et des fissures présente un ruissellement de 10% inférieur à celui de Kalaât plus battant (sans fentes). A côté de quelques différences physiques, c'est imputable principalement au mode d'irrigation (Fig.3a et 3b).

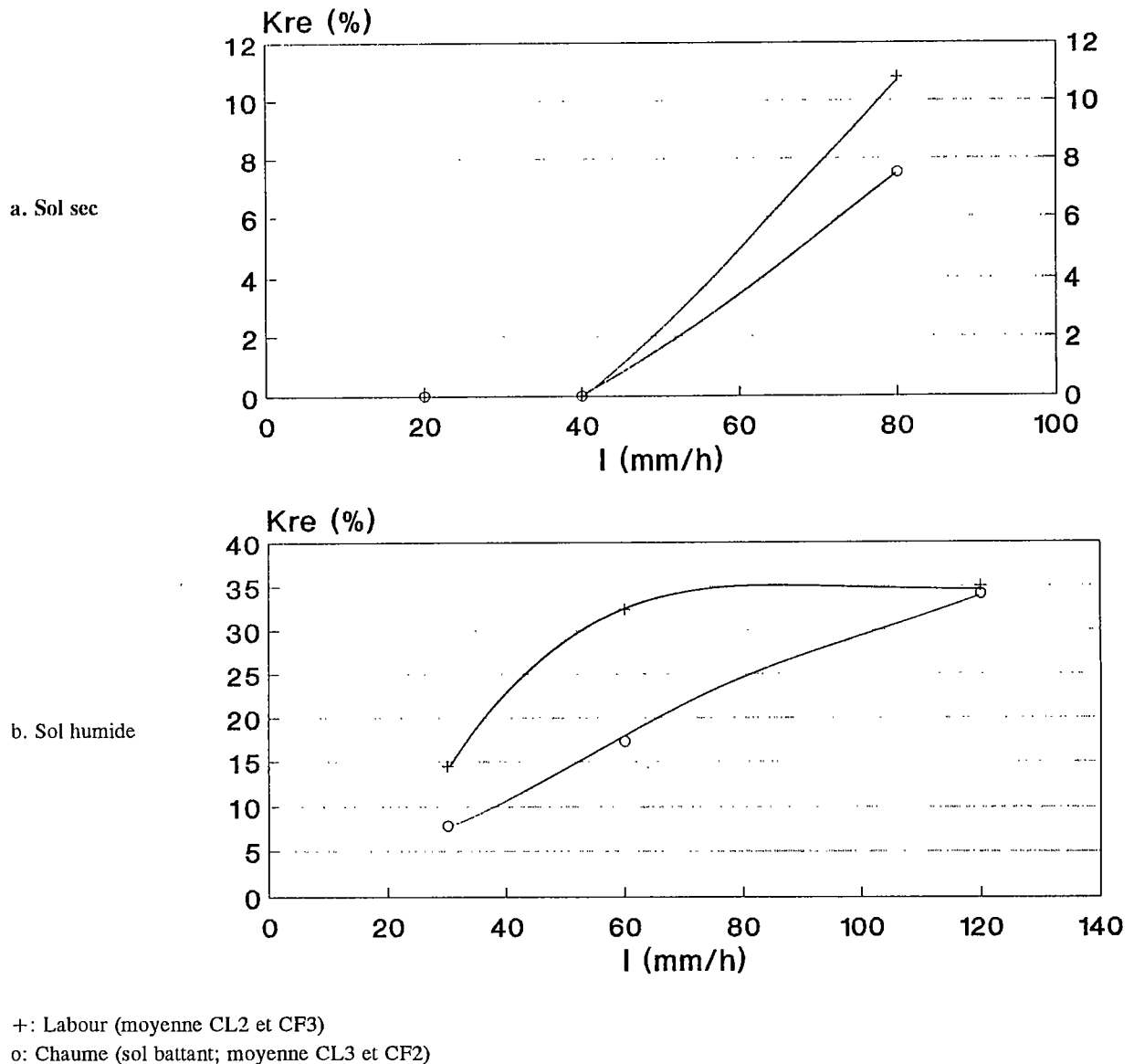


Figure 3. Variation du ruissellement - Cebalat Borj-Touil.

La différence liée au sens du labour par rapport à la pente intervient également dans l'efficacité de l'infiltration pour 5 à 10%. L'analyse en composantes principales réalisée par M'Della (1990) a confirmé l'influence en premier lieu de la pellicule de battance sur le ruissellement et en second lieu de celle de tous les facteurs dont elle dépend. Sur sol sec, la pluie efficace intervient comme facteur principal conditionnant le ruissellement. Sur sol humide, cette pluie perd son importance au profit des paramètres morphométriques.

Les matériaux érodés sont formés des constituants granulométriques, de la matière organique et aussi de sels. Leur analyse aurait apporté des informations quantitatives précises. Valentin (1985) constate que les fentes qui apparaissent sur alluvions argileuses ne se referment qu'après un certain temps et allongent par conséquent la durée d'imbibition. Elles "court-circuitent" l'apparition du ruissellement. Il observe une détachabilité sélective de l'argile pour les horizons labourés, mais pas pour les sols non perturbés protégés par les O.P.S. L'appauvrissement relatif en argile est d'autant plus marqué, que la teneur en est faible. L'horizon superficiel subit un enrichissement relatif en limons fins et grossiers, et secondairement en sables fins et grossiers.

### 3.2.2. Dégradation de la structure des sols

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 (Le Bissonnais Y. et al., 1990).

A Kalaât, quand les averses surviennent sur un labour qu'il soit sec ou bien humide, l'érosion ne se manifeste que pour une intensité élevée de 120 mm/h (Fig. 4). L'érosivité (détachabilité) du millimètre d'eau ruisselé est d'environ 4 g/mm/m<sup>2</sup> soit 0,04 t.ha<sup>-1</sup> par mm ruisselé pour le labour effectué dans le sens contraire de la pente et double pour celui réalisé dans le sens de la pente (Tableau 4). Dans le cas où les averses se produisent sur une parcelle sèche non labourée, couverte de pellicules de battance, l'érosion se manifeste à partir d'une intensité de 80 mm/h mais se caractérise par une très forte variabilité spatiale, de 0,8 à 4,5 g/mm/m<sup>2</sup>. A 120 mm/h, l'érosivité s'élève à plus de 3,65 g/mm/m<sup>2</sup>. Quand le sol est humide, l'érosion se produit avec une pluie de 30 mm/h.

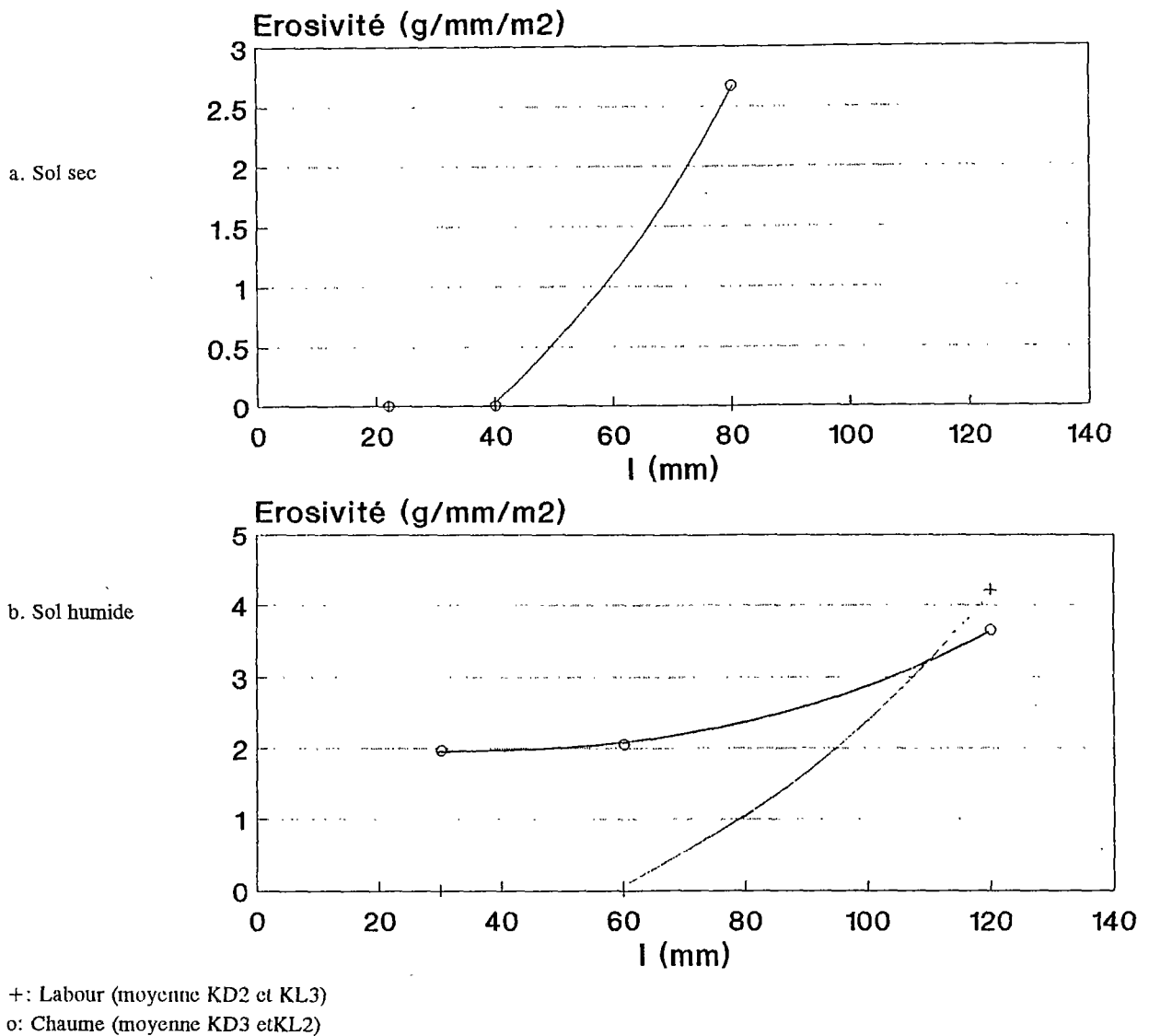


Figure 4. Variation de l'érosivité - Kalaât Landelous.

A Cebalat, l'érosivité dans un sol sec est d'environ  $3,4 \text{ g/mm/m}^2$  sous une intensité de  $80 \text{ mm/h}$  (Fig.5a). Sur sol humecté la veille (Fig.5b), elle peut apparaître sous une intensité de  $30 \text{ mm/h}$  sur un labour effectué dans le sens de la pente. Alors qu'elle est pratiquement nulle quand le labour est effectué dans le sens contraire de la pente (Tableau 5).

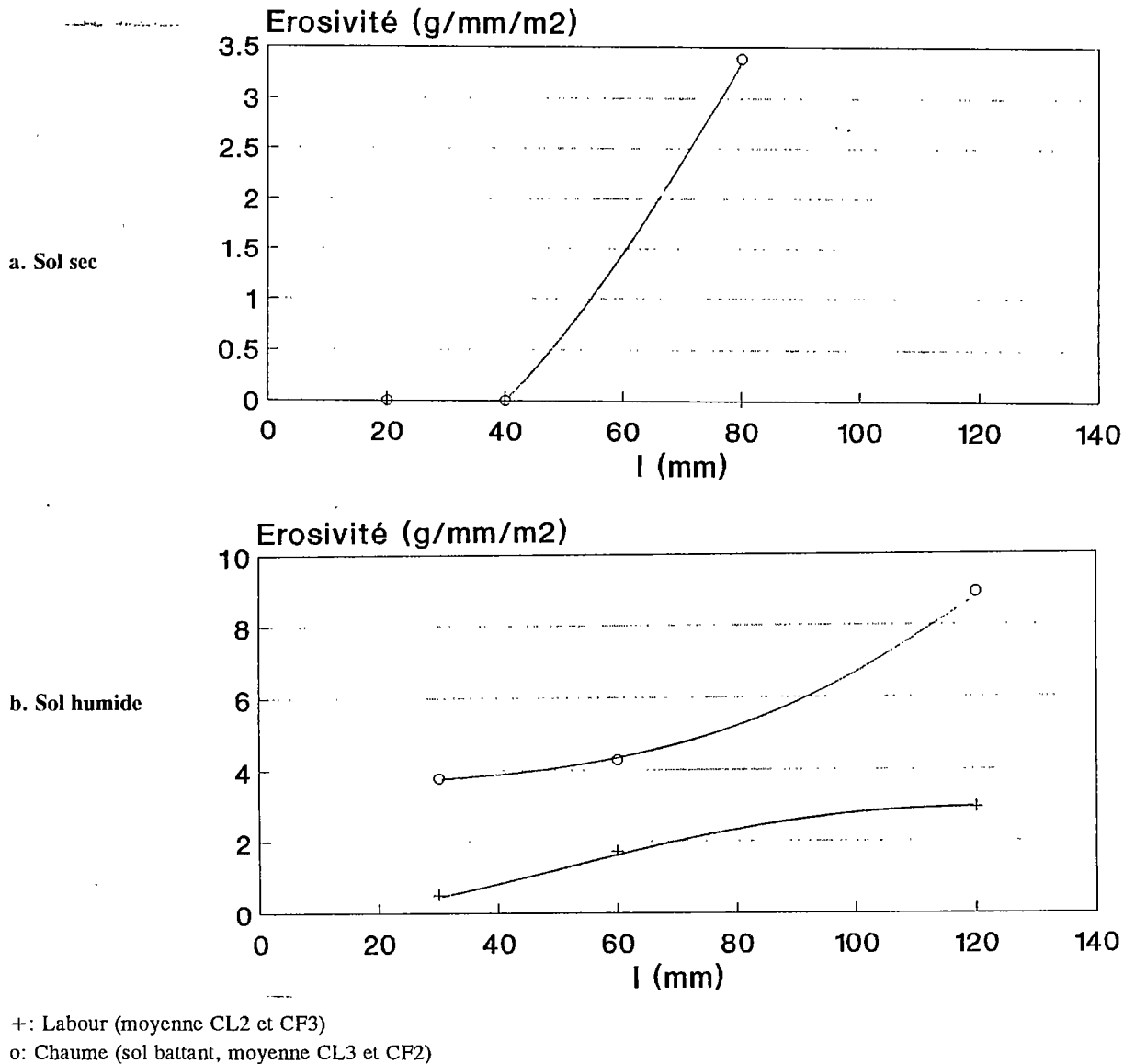


Figure 5. Variation de l'érosivité - Cebalat Borj-Touil.

Sur des parcelles couvertes par des pellicules de battance, l'érosion apparaît sur sol sec à partir d'une intensité de  $80 \text{ mm/h}$ . L'érosivité peut être moyenne,  $1,6 \text{ g/mm/m}^2$  (dans CF2) à forte,  $5,2 \text{ g/mm/m}^2$  (dans CL3). Sur sol humide, elle se déclenche à partir de  $30 \text{ mm/h}$  ( $3,7 \text{ g/mm/m}^2$ ), s'élève à  $60 \text{ mm/h}$  à environ  $4,3 \text{ g/mm/m}^2$  et double sous une intensité de  $120 \text{ mm/h}$  ( $8,9 \text{ g/mm/m}^2$ ).

L'averse  $30 \text{ mm/h}$  apparaît dans certaines parcelles plus érosives que l'averse  $60 \text{ mm/h}$ . En fait, dans une séquence donnée, les averses de faibles intensités qui précèdent une averse plus intense, commencent par humecter les agrégats qui s'éclatent progressivement. Les éléments fins déliées de leur squelette sont ainsi disponibles à l'entraînement et au transfert horizontal, ce que l'intensité qui succède se charge de faire. Ce raisonnement s'applique également à l'enchaînement des séquences P1, et P2 et P3 qui se réalisent le lendemain. Il serait donc erroné 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 perpétuelles transformations. Les phénomènes de désagrégation peuvent avoir plusieurs origines. Les mécanismes apparaissent presque simultanément en début de pluie (Valentin, 1985):

- gonflement, liquéfaction et dispersion des argiles smectitiques. Les mécanismes de gonflement et de liquéfaction favorisent la dispersion des colloïdes, et ceci d'autant plus que le complexe absorbant est riche en sodium (Quirk, 1978);

- éclatement des agrégats et fragmentation structurale au cours de l'humectation sous l'effet de la pression de l'air des capillaires;

- impact des gouttes de pluies: effet de l'énergie cinétique des pluies sur la désagrégation.

**Tableau 4. Principaux résultats des simulations des pluies - Périmètre de Kalaât Landelous (les 29 et 30/9/1992).**

Parc elle	Réf. Pluie	Durée mn	I mm/h	Pu mm	Pi mm	Pe mm	Lr mm	Kru (%)	Kre (%)	Er g/mm/m <sup>2</sup>	Rx mm/h	W mm
KD2	P1	15	22	5	5,5	0	0	0	0	0	0	5,5
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	10,7	9,3	0,3	1,5	3,2	0	3,0	19,7
	P2	20	30	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	60	15	3,0	12,0	0,2	1,4	1,7	0	1,8	14,8
	P3	10	120	20	1,2	18,4	1,2	5,8	6,5	3,08	6,0	18,8
KD3	P1	15	22	5	5,5	0	0	0	0	0	0	5,5
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	5,3	14,7	1,9	9,5	12,9	0,84	24,0	18,1
	P2	20	30	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	60	15	0	15,0	4,1	27,2	27,3	0,59	23,7	10,9
	P3	10	120	20	3,0	17,0	12	60,2	70,6	2,78	110,7	8,0
KL2	P1	15	22	5	5,5	0	0	0	0	0	0	5,5
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	2,7	17,3	4,7	23,5	27,2	4,49	39,0	15,3
	P2	20	30	10	1,5	8,5	1,7	16,8	20,0	1,94	15,0	8,3
		15	60	15	0	15,0	9,8	65,0	65,3	3,51	54,0	5,3
	P3	15	120	30	1,2	28,8	14,7	48,9	51,0	4,52	99,0	15,3
KL3	P1	15	22	5	5,5	0	0	0	0	0	0	5,5
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	2,7	17,3	0,5	2,8	2,9	0	4,2	19,5
	P2	20	30	10	5,0	5,0	0,3	3,4	6,0	0	3,0	9,7
		15	60	15	0	15,0	0,5	3,2	3,3	0	3,6	14,5
	P3	10	120	20	2,0	18,0	2,7	13,5	15,0	5,33	21,0	17,3

Tableau 5. Principaux résultats des simulations des pluies-Périmètre de Cebalat Borj Touil ( les 2 et 3/10/1992).

Parcelle	Réf. Pluie	Durée mn	I mm/h	Pu mm	Pi mm	Pe mm	Lr mm	Kru (%)	Kre (%)	Er g/mm/m <sup>2</sup>	Rx mm/h	W
CL3	P1	15	20	5	5,0	0	0	0	0	0	0	5,0
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	0	20,0	4,0	19,8	20,0	5,15	6,0	19,0
	P2	20	30	10	3,0	7,0	2,0	20,0	28,6	3,7	0,6	10,0
		15	60	15	0	15,0	9,3	62,3	62,0	5,53	12,0	13,7
	P3	10	120	20	1,2	18,8	11,2	57,8	59,6	11,48	48,0	15,3
CF2	P1	15	20	5	5,0	0	0	0	0	0	0	5,0
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	0	20,0	2,0	9,8	10,0	1,6	12,0	18,1
	P2	20	30	10	0,7	7,5	0,7	7,2	9,3	3,86	2,4	9,3
		15	60	15	3,9	15,0	3,9	26,2	26,0	3,03	21,0	11,1
	P3	10	120	20	1,3	18,7	7,9	39,5	42,2	6,38	75,0	12,1
CL2	P1	15	20	5	5,0	0	0	0	0	0	0	5,0
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	0	20,0	1,0	5,0	5,0	0	27,0	16,1
	P2	20	30	10	8,5	1,5	0,1	0,5	6,7	1,0	12,0	8,0
		15	60	15	0	15,0	1,3	9,0	8,7	3,46	42,0	5,7
	P3	10	120	20	2,0	18,0	4,7	23,4	26,1	2,91	90,0	8,4
CF3	P1	15	20	5	5,0	0	0	0	0	0	0	5,0
		15	40	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	80	20	8,0	12,0	1,0	1,0	8,3	0	1,8	19,8
	P2	20	30	10	10,0	0	0	0	0	0	0	10,0
		15	60	15	4,0	11,0	0,3	2,0	2,7	0	1,8	14,7
	P3	10	120	20	2,0	18,0	1,5	7,5	8,3	3,0	10,8	18,5

### 3.2.3. Quelques aspects relatifs au lessivage des sels

Le lessivage des sels est le résultat de la dissolution des accumulations salines et l'entraînement des sels libres. L'infiltration ne joue que sur le dernier phénomène. Dans les périmètres de Cebalat et Kalaât, les chlorures de sodium, en majorité des halites prédominent largement sur les autres types de sels (Bach Hamba, 1992). 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 un meilleur lessivage des sels. Deux contraintes majeurs s'opposent à cette hypothèse. D'abord, la tranche de sol humecté dans les essais de simulation est souvent une la couche de surface alors le lessivage des sels concerne tout l'épipédon. Ensuite, le ruissellement de surface contribue au déssalage des sels accumulés en surface. Néanmoins, dans les conditions de Kalaât et Cebalat, le ruissellement est faible et locale et la présence d'une nappe phréatique à moins de 1,60 m maintient le sol au dessus à une humidité élevée. Dans ces conditions, l'efficacité du lessivage 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 du lessivage des sels diminue quand celle du ruissellement augmente et vis versa. Selon cette considération, on peut avoir le tableau suivant:

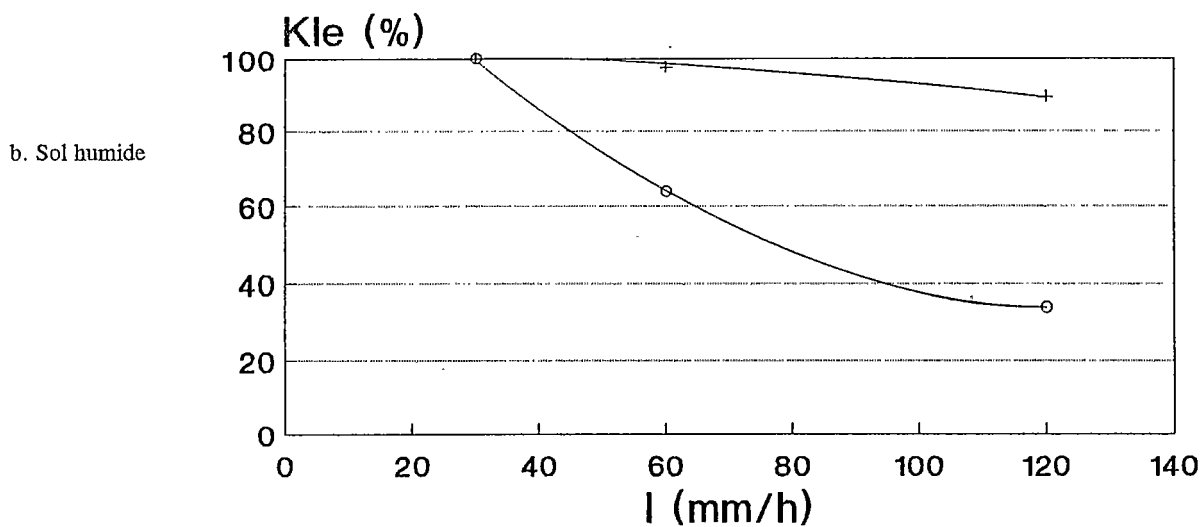
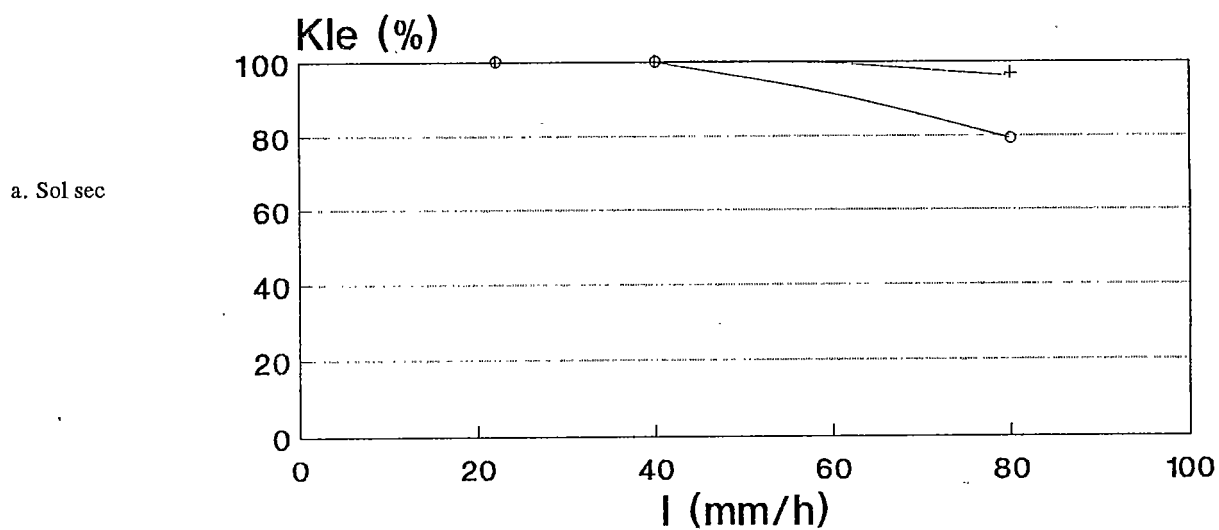
**Tableau 6. Efficacité du lessivage des sels de sols limono-argileux selon l'état d'humidité du sol, son état de surface et l'intensité des pluies.**

Etat d'humidité	Etat de surface	intensité mm/h	Efficacité du lessivage des sels(%)
sol sec ( $\theta_s=15\%$ )	battance labour	20	100
	battance labour	40	90 > 95
	battance labour	80	80 > 90
sol humide ( $\theta_s=25\%$ ) ( humecté la veille )	battance labour	30	70 à 90 90 à 95
	battance labour	60	40 à 75 80 à 90
	battance labour	120	< 40 < 85

A la limite, on peut concevoir un coefficient d'efficacité du lessivage des sels qu'on appelle  $K_{le}$  qui serait déduit du coefficient du ruissellement efficace  $K_{re}$ ,  $K_{le}=(1-K_{re})\cdot 100$ . Les figures 7 et 8 représentent  $K_{le}$  en fonction de  $I$  pour deux états de surface de sols secs. Sur sol humide, l'efficacité du lessivage diminue de 10 à 30% , toute chose étant par ailleurs égale.

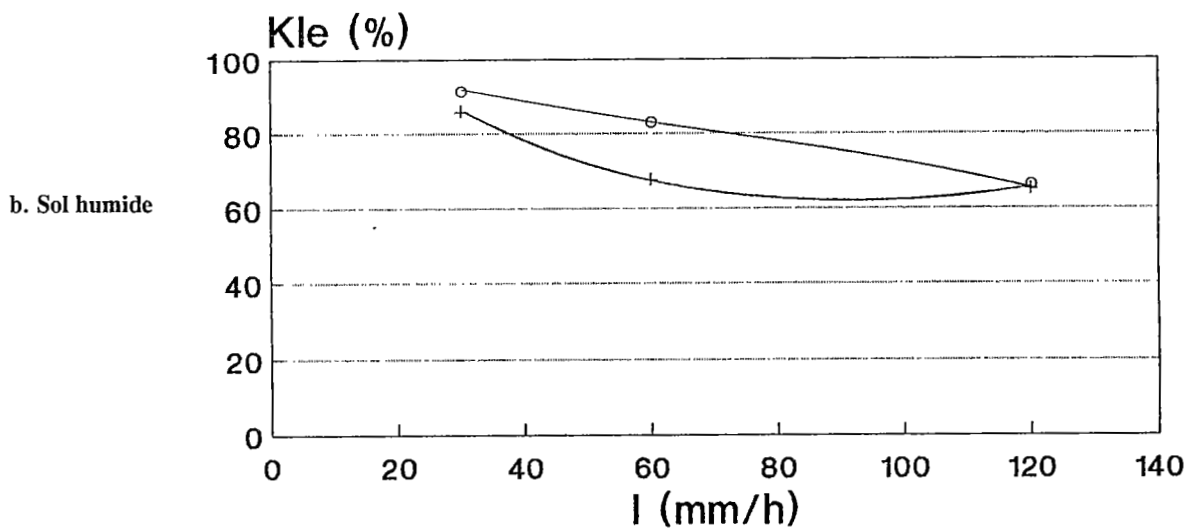
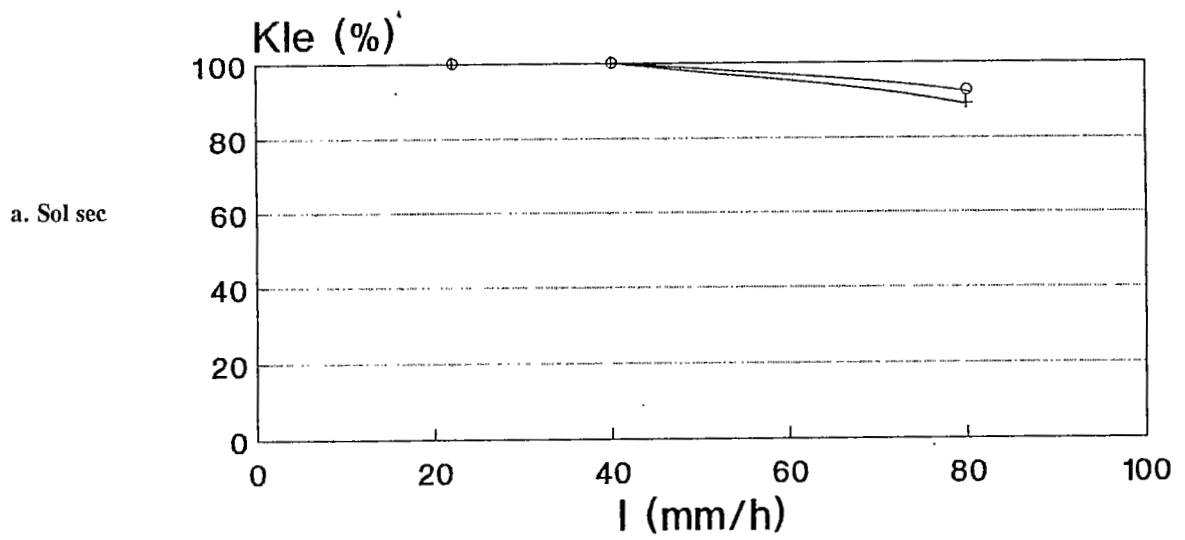
Le mode d'irrigation de ces sols génère une organisation superficielle. L'aspersion produit des pellicules de battance favorables au flaquage et au ruissellement. Le travail du sol et en particulier le labour après la récolte de la culture estivale sont des mesures anti-érosives efficaces pour le lessivage des sels. Cependant après les premières averses d'automne, le sol humecté devient boueux et un nouveau obstacle à l'infiltration réapparaît.

Par ailleurs, les O.P.S réduisent les pertes d'eau par évaporation. Le tassement de l'horizon travaillé et son assèchement conduit à une "auto-protection" ou "auto-mulch" qui ralentit la remontée des sels. Dans ces sols, l'infiltration de l'eau de pluie ne peut pas assurer complètement le lessivage des sels. La présence d'O.P.S limite considérablement l'entraînement vertical des sels vers les drains, mais peut augmenter le lessivage des sels accumulés en surface.



+ : Labour (moyenne KD2 et KL3)  
 o : Chaume (sol battant, moyenne KD3 et KL2)

Figure 6. Variation du lessivage des sels - Kalaât Landelous.



+: Labour (moyenne CL2 et CF3)  
o: Chaume (moyenne CL3 et CF2)

Figure 7. Variation du lessivage des sels - Cebalat Borj-Touil.

### 3.3. Evaluation de la conductivité hydraulique sur sols saturés.

A Kalaât, les mesures sous lame d'eau de 3 cm employant le dispositif de Müntz dans les parcelles labourées aboutissent à des conductivités hydrauliques à saturation ( $K_m$ ) de l'ordre de 102 mm/h, quatre fois plus élevées que dans les parcelles couvertes par des pellicules de battance où elle est de l'ordre de 24 mm/h.

A Cebalat, les valeurs  $K_m$  sont plus variables (Tableau 7). Sur les labours qui ont subi les averses de la simulation,  $K_s$  varie de 54 mm/h à 528 mm/h. Cette dernière valeur, qui semble aberrante à première vue, provient de 4 répétitions. Valentin (1985) obtient des valeurs comparables dans ses essais. Les variations s'expliquent par une certaine hétérogénéité texturale et structurale. Pour les parcelles à la fois couvertes par des pellicules de battance et fissurées,  $K_m$  varie entre 36 mm/h et 108 mm/h.

Lorsque la zone située sous les O.P.S approche de la saturation, l'intensité d'infiltration  $F_n$  tend vers  $K_s$  du modèle de Green et Ampt (1911), Valentin (1985) considère qu'elles sont très voisines des conductivités mesurées pour la dernière séquence pluvieuse. L'intensité limite de ruissellement est assimilée à la conductivité hydraulique saturée. Nous l'avons déterminé pour les différentes parcelles (Tableau 7).

Les valeurs de  $I_l$  de la dernière séquence pluvieuse P3 à Kalaât varient entre 99 et 114 mm/h pour les parcelles labourées et 9,3 mm/h et 21 mm/h pour celles couvertes par des pellicules de battance. Elles sont ainsi très peu dispersées. Les intensités au dessus desquelles les parcelles ruissellent, sont indicatrices de la capacité maximale d'absorption des sols. Les séquences P1 et P3 surviennent successivement sur sol sec et sur sol humide. L'averse 80 mm/h de la séquence P1 induit très nettement des intensités limites supérieures à celles de P3 dans le non labouré et inférieures dans le labour.

A Cebalat, les valeurs de  $I_l$  de P3 varient entre 30 et 109,2 mm/h pour les parcelles labourées et 45 mm/h et 72 mm/h pour celles couvertes par des pellicules de battance et fissurées. Ces valeurs ne présentent pas de tendances de variation décelables qu'on peut rattacher à des organisations superficielles différentes.

Nos simulations de pluies aboutissent à des intensités limites de ruissellement qui se rapprochent assez des conductivités hydrauliques saturées obtenues par la méthode Müntz.

Pour la mesure des conductivités hydrauliques saturées sous pluies simulées, plusieurs modèles existent pour prévoir l'infiltration de l'eau dans le sol. Valentin (1985) propose le modèle de Green et Ampt (1911) qui repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices.

Comme l'intensité d'infiltration  $F(t)$  est inversement proportionnelle à la profondeur  $z(t)$  atteinte par le front d'humectation (Loi de Darcy):

$$F(t) = K(\Theta) * [\Gamma_f + z(t)] / z(t)$$

$\Gamma_f$ : Potentiel matriciel

Si l'on considère la zone humectée comme saturée,  $K(\Theta)$  est égale à  $K_s$ . Partant de cette équation, Valentin (1985) parvient à la suivante qu'il applique à la fin de la pluie qui survient au temps  $t_u$ :

$$K_a = [F_n * W(t) - P_i * I] / [W(t) - P_i]$$

avec  $K_a$ : conductivité hydraulique déterminée par le modèle de Green et Ampt,  $W(t)$  lame infiltrée et  $F_n$  infiltration minimale stabilisée.

Pour appliquer cette équation aux résultats expérimentaux, ceux-ci doivent satisfaire aux deux conditions:

- $P_i$  différent de  $W(t)$ , le ruissellement doit se manifester;
- $F_n > P_i * I / W(t_u)$

Les conductivités hydrauliques saturées calculées selon cette équation ( $K_a$ ) sont assez similaires à celles précédemment décrites (Tableau 7).

Les conductivités hydrauliques saturées déterminées par le dispositif Müntz et graphiquement par les pluies simulées, ou par le modèle de Green et Ampt (1911) ne sont pas directement comparables, puisqu'elles ne correspondent pas aux mêmes approches. Cependant, plusieurs auteurs ont tenté de faire le rapprochement. Ils ont remarqué que les valeurs déterminées sous double anneau sont nettement supérieures à celles que l'on mesure sous pluies. Dans des sols argileux du Nord de la Tunisie, Bel Hadj Ali (1989, cité par M'Della, 1990) trouve que le coefficient d'infiltration à saturation ( $I$ ) est 4 à 10 fois inférieur à la conductivité hydraulique saturée déterminée par le dispositif de Müntz ( $K_m$ ). Valentin (1985) parvient à des valeurs très basses et nettement inférieures à celles qu'il obtient par la méthode Pioger (une différence de 1 à 10). Lafforgue et Naah (1976) ont abouti à des résultats très écartés entre les intensités d'infiltration mesurées à l'aide du dispositif Müntz et sous pluies simulées.

En appliquant le test statistique de comparaison des données deux à deux, nous avons procédé à une analyse des conductivités hydrauliques saturées:  $K_m$  obtenue par le dispositif de Müntz,  $K_a$  par le modèle de Green et Ampt et déterminée graphiquement. Il s'avère que:

- $K_a$  et  $I$  sont significativement égales au seuil 5 %;

- si on supprime la valeur très élevée de la parcelle CF3, les valeurs de  $K_m$  sont significativement égales aux  $K_a$  et  $I$  au seuil 5%.

Ainsi, nous obtenons une bonne reproduction de l'infiltration selon les différentes approches. Il est encore hasardeux de conclure que les deux types d'approches pourtant très différentes conduisent dans tous les cas à des résultats voisins, mais il est intéressant de signaler que dans le cadre de ces travaux, ils sont concordants. Les différences de résultats peuvent provenir:

- des réactions de la surface du sol: elles sont rarement identiques sous lame d'eau et sous pluies (Lafforgue et Naah, 1976). Quand la lame d'eau recouvre les agrégats, on assiste à leur destruction et à la formation très rapide d'une O.P.S qui obture la macroporosité sous-jacente mais cette fois-ci aucune énergie cinétique des gouttes de pluies n'intervient (Valentin, 1985). Sous pluies simulées, le temps de ressuyage entre les séquences d'averses intervient dans l'évolution des organisations de surface des sols.

- de l'influence des succions latérales sur le volume humecté: dans le cas du double anneau, l'infiltration est totale.

- de l'épaisseur de matériaux: Les conductivités hydrauliques saturées déterminées par le dispositif Müntz et par les pluies simulées ne correspondent pas aux mêmes épaisseurs de matériaux, une vingtaine de centimètres dans le premier cas, environ la moitié dans le second.

- de l'évolution des états de surface des parcelles au cours des pluies: Cette évolution provoque une diminution de l'infiltration. Dès les premières minutes de l'averse, une croûte structurale s'individualise. Sa transformation en croûte d'érosion provoque une décroissance rapide de l'infiltration du sol (Poss et al., 1991).

En outre, l'intensité d'infiltration dépend non seulement des propriétés hydrauliques de l'O.P.S mais également de celles de la zone sous-jacente (Raats, 1974). L'infiltration sera donc d'autant plus faible que cet horizon situé sous l'O.P.S sera macroporeux. Les tous premiers millimètres du sol apparaissent contrôler à saturation la conductivité de l'ensemble. Valentin (1985) montre que la quantification de la porosité sur des lames minces d'O.P.S, permet une meilleure prévision de la conductivité hydraulique saturée d'un sol, que les mesures menées à l'aide d'un dispositif à double anneau ou obtenues de la simulation de pluies.

Tableau 7. Comparaison des conductivités hydrauliques saturées à partir des relations de Green et Ampt ( $K_a$ ), des mesures Müntz ( $K_m$ ) et des valeurs empiriques d'intensité limite de ruissellement ( $I$ ).

Périmètre	Site	Etat de surface après simulation	$K_m$ mm/h	Intens. limite mm/h			$K_a$ mm/h
				P1	P2	P3	
Kalaât	KL2	Chaume maïs +	24	44	24	21	12,6
	KD3	Pell. battance	24	59,3	48	9,3	36,3
	KL3	Lab.+Pell. de	102	77	27	99	96,3
	KD2	battance induites par les averses	102	77	58,8	114	113,6
Cebalat	CF2	Chaume maïs+Pell.	108	68	39	45	36
	CL3	+ fissures	36	56	24	72	67,9
	CF3	Lab.+Pell. de	528*	78,8	58,8	109,2	107,9
	CL2	battance induites par les averses	54	77	57	30	12,7

\*: la mesure a été répétée 4 fois.

### 3.4. Conséquences sur le mode d'irrigation

Les sols alluviaux riches en éléments fins très répandus dans les milieux irrigués de Tunisie sont fréquemment affectés par la battance. Les conséquences de cette organisation de surface sur la gestion optimale des eaux et des sols sont manifestes. Suivant l'évolution des sols, en fonction des modalités d'une irrigation gravitaire intensive pendant 20 ans dans les plaines de la Basse Moulouya (Maroc) et comparant deux sols cultivés, l'un non irrigué, l'autre irrigué, Mathieu et al. (1987) montrent l'influence marquée de l'irrigation sur la morphologie des 50 premiers centimètres du sol, principalement par la diminution de la porosité. Les irrigations par submersion favorisent l'induration des couches superficielles argilo-limoneuses. Elles sont limitées quand la dessiccation est rapide alors qu'un dessèchement plus lent les favorise. L'induration serait en outre inversement proportionnelle au nombre de cycles d'humectation et de dessiccation que les O.P.S ont subi. Ceux-ci multiplient les zones de fractures (Valentin, 1985), ce qui est le cas en été lors des cycles d'irrigation.

L'instabilité structurale des agrégats de la parcelle labourée est supérieure sous submersion. La désagrégation se réduit au gonflement, liquéfaction et dispersion des argiles smectitiques, suivie de l'éclatement des agrégats et leur fragmentation structurale. Tous ces phénomènes se déroulent sur place sans aucun transport latéral de matériaux. Le seul transfert d'éléments fins s'observe dans les voies de circulation d'eau quand le débit est assez fort. Le trigranulométrie est très faible. S'appuyant sur nos observations, les niveaux de lamines (Valentin, 1985) qui constituent les microhorizons apparaissent réduits à une première lamine de 1 mm environ, à dominance de limons, suivie d'une seconde plus épaisse de matériaux compacts qui forme ensemble une croûte qui se distingue du microhorizon sous-jacent et se sépare par une zone à gros pores qui préserve quelques caractères des agrégats formés au cours du labour.

Les O.P.S générées sous irrigation par aspersion s'apparentent de près à celles obtenues sous pluies simulées. Plusieurs auteurs ont employé cette technique pour le choix des asperseurs adéquats. Lors d'une expérimentation de terrain mettant en oeuvre irrigation par aspersion et simulation de pluie, Valentin et al. (1987) ont relié les modifications morphologiques de la surface du sol à des mesures hydrodynamiques. Parmi trois modèles d'asperseurs utilisés, un seul produit des énergies cinétiques correspondant à des pluies naturelles de faible intensité. Dans le cas de l'asperseur employé en Tunisie, les jeteurs et la pression utilisée reproduisent la gamme la plus probable des énergies cinétiques des pluies de la région. L'aspersion conduit à la longue à un ameublissement de la surface des sols: rejaillissement de particules, ruissellement, entraînement latéral et comblement des macropores et des micro-dépressions. La désagrégation engendre des dépôts de flux laminaires et de flux turbulents qui s'organisent en microhorizons formés de lamines plus moins ou moins par un processus de granulo-classement.

Les O.P.S qui résultent de l'une des deux méthodes d'irrigation sont détruites par le labour. Ce dernier a pour effet non seulement de bouleverser la structure, mais également de modifier la composition granulométrique de l'horizon de travail. Le labour, suivi des pluies et de la dessiccation, s'accompagne de la formation d'une O.P.S dont la porosité est nettement plus réduite que l'O.P.S initiale. En outre, les mottes s'émeussent par les pluies.

En ce qui concerne le comportement hydrodynamique et la conséquence sur la dynamique des sels, on constate:

(i) l'horizon à gros pores situé sous l'O.P.S 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, 1964; Hillel et Gardner, 1969).

(ii) 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 en jouant le rôle d'un mulch. Le flux ascendant des sels depuis la nappe phréatique superficielle salée se trouve ainsi réduit.

(iii) les O.P.S qui résultent de l'aspersion limitent l'infiltration. La parcelle irriguée par submersion présente une conductivité hydraulique saturée à peu près double à celle gérée par aspersion (24 mm/h). Il faut aussi noter l'effet des fentes qu'on retrouve dans le premier cas et qui disparaissent dans le second.

Enfin s'agissant de l'érosivité en fonction des façons culturales, on observe que:

(i) le labour précoce d'automne est favorable à l'infiltration de l'eau et à la réduction du ruissellement. Ceci conduit au meilleur lessivage des sels, à une amélioration des réserves hydriques et au comblement et à la fermeture des fissures qui peuvent acheminer les eaux pluviales directement vers les drains, les rendant ainsi inefficaces. Le labour en contre sens, même quand la pente est inférieure à 1%, réduit le transfert latéral des matériaux;

(ii) l'érosivité augmente avec l'aspersion. Il s'en suit un enrichissement en limon et un appauvrissement en argile et en éléments nutritifs. Alors que les fentes que génère la submersion allongent l'imbibition;

Les mêmes intensités de pluie érodent plus le sol à Cebalat qu'à Kalaât. Ce comportement ne peut être attribué qu'à la teneur plus élevée en limons, facteur de battance (Mtimet, 1987), mais aussi à la dispersion des argiles, le sol étant plus salé et sodique à Cebalat.

## CONCLUSION

Dans la vallée de la Mejerda, les sols limono-argileux et salsodiques aménagés au cours de la dernière décennie subissent entre l'automne et l'été, l'impact des pluies qui permettent un certain lessivage des sels et une réorganisation de leur surface.

Les simulations de pluies ont été menées sur des parcelles labourées et d'autres non labourées 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 des organisations superficielles. Les fissures présentes ordinairement dans ces sols disparaissent sous leur obstacle. A Cebalat, la submersion conserve les fissures. Les pellicules de battance qui apparaissent n'empêchent pas la dessiccation du sol.

Dans ces paysages géochimiques à dominance de chlorures de sodium, l'infiltration est proportionnelle au lessivage et joue particulièrement sur l'entraînement des sels. Dans ce sens, les simulations sont d'un grand intérêt. Les pluies automnales s'expriment par une bonne infiltration et par conséquent par un meilleur lessivage 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 qui 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 structure fondue, plus claire que la couleur initiale du sol, résulte d'un appauvrissement en matière organique parallèle au départ des éléments fins.

Si l'effet de la sodicité n'a pas été mis en évidence, le sens du labour par rapport à la pente peut accélérer ou modérer la dégradation de la structure. La nature argileuse de certains sites situés en bas de pente peut provenir de l'arrachement par les pluies d'éléments fins des alluvions déposées au cours des crues.

Les conductivités hydrauliques sur sols saturés provenant des essais de simulation ou des mesures Müntz et basées sur des approches différentes convergent au niveau des valeurs. La désagrégation mise en place sous lame d'eau ou sous pluies simulées donnent lieu à des organisations pelliculaires superficielles qui agissent fortement sur les phénomènes de transferts hydriques et des solutés.

Les intensités d'infiltration mesurées par la méthode de Müntz et réalisées en condition de saturation maximale sont pour la plupart similaires aux intensités limites de ruissellement déduites des essais de simulation. Si on peut admettre ces intensités 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.

Plusieurs aspects apparaissent liés à l'un ou l'autre des modes d'irrigation: aspersion et submersion. Il s'agit de la nature des organisations superficielles et du comportement des sols vis à vis de l'eau, des solutés et de la détachabilité des matériaux.

Moyennant certaines modifications ( gamme des intensités, qualité de l'eau utilisée, etc...), la simulation de pluies peut avoir un champs d'application plus vaste et être par conséquent d'un grand intérêt pour l'étude de l'évolution de la salure des sols sous différents régimes hydriques et modes de gestion.



## BIBLIOGRAPHIE

- ASSELINE J., CLERY J., MTIMET A., PONTANIER R., 1989.-** Programme de dépouillement des relevés d'états de surface (1986). Sols de Tunisie n°14. pp. 159-171.
- 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.
- BAHRI A., HENTATI A., MTIMET A., PONTANIER R., 1989.-** Etude de l'érodibilité, des variables physico-hydrauliques et du fonctionnement hydrique des terres cultivées en vue de l'établissement de documents cartographiques. Sols de Tunisie n°14. pp. 7-10.
- BACH HAMBA I., 1992.-** Bonification des sols. Cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous- Caractérisation de la salinité initiale du sol en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mém. Fin d'Etudes du Cycle de Spécialisation Pédologie et mise en valeur des terres.
- BOUKSILA F., 1992.-** Bonification des sols. Cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous- Caractérisation physique des sols et étude de la variabilité spatiale de leurs propriétés en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mém. Fin d'Etudes du Cycle de Spécialisation Pédologie et mise en valeur des terres. 191 pages.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1979.-** Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse de comportement d'un sol au champ. Ann. Agron., 27 (3): 295-325.
- BRESLER E., KEMPER W.-D., 1970.-** Soil water evaporation as affected by wetting methods and crust formation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34 (1): 3-8.
- 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..
- CHNINA M., 1991.-** Dépouillement et exploitation des données de simulation de pluie en Tunisie. Mém. Fin Etude ESIER Mejez El Bab. 45 pages.
- COLOMBANI J., LAMAGAT J.-P., THIBEAUX J., 1972.-** Mesure de la perméabilité des sols en place: un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol.IX, n°3 pp. 15-46.
- CRUESI- PNUD/UNESCO, 1970.-** Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées, 1962-1969. Rapport technique.
- DURAND J.-H., 1983.-** Les sols irrigables. Etude pédologique. Edition ACCT-PUF: 143-217.
- ESCADAFAL R., 1981.-** L'étude de la surface du sol dans les régions arides - Recherches méthodologiques. Direction des Sols/ORSTOM Tunis, ES 187.
- ESCADAFAL R., ASSELINE J., MTIMET A., 1986.-** Etude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar - Sud tunisien ). Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Direction des Sols ES 231. pp. 1-33.
- 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., LE FLOC'H E., PONTANIER R., 1976.-** Carte de sensibilité à la désertification. Processus de dégradation en cours des sols et de la végétation. Tunisie centrale et méridionale. Sols de Tunisie, n°8, p.1-69.
- 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.
- GREEN W.-H., AMPT G.-A., 1911.-** Studies on soil physics -1- The flow of air and water through soils. J. Agric. Sci., 26: 124-129.
- HACHICHA M., TRABELSI A., 1990.-** Salinité des terres et perméabilité des sols dans le périmètre de Cebalat Borj-Touil irrigué aux eaux usées. Direction des Sols, ES 257.
- HACHICHA M., 1990.-** L'efficacité des pluies torrentielles dans le lessivage des sels. Séminaire ATRID-AGT "Erosion, sol, eau" INAT, 14/11/1990.
- HACHICHA M., DJELIDI B., TRABELSI A., BRARI N., 1992.-** L'impact du drainage sur les variations saisonnières de la salinité dans le périmètre de Cebalat Borj-Touil irrigué aux eaux usées épurées. Direction des Sols, ES 264.
- HACHICHA M., TRABELSI A., 1993.-** Evolution sous culture irriguée à l'eau salée des sols lourds salés de Kalaât Landelous. Résultats de la campagne de mesure de l'été 92. Direction des Sols.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969.-** Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Edit. Masson, Paris.
- HILLEL D., 1964.-** Infiltration and rainfall-runoff as affected by surface crusts. In: Proc. of the VIIth Congr.Intern. Soil Sci. Bucarest, I (7): 53-61.

- 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.
- JOB J.-O., 1992.-** Les sols salés de l'oasis d'El Guettar. Thèse Doc., Univ., Montpellier II, 150 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.
- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A. et JAMAGNE M., 1990.-** Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodibilité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV, n°1-2, 1989-90: 31-40.
- MATHIEU C. et RUELLAN A., 1987.-** Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride: l'exemple de la Basse-Moulouya (Maroc). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIII, n°1 : 3-25.
- MARTINI P., DEROUICH Ch., PONTANIER R., 1991.-** Gestion et exploitation des données de simulation des pluies en Tunisie - Le programme DSSIMUL. *Direction des Sols, ES 260*, 17 p.
- Mc INTYRE D.-S., 1958 a.-** Permeability measurements of soil crusts formed by impact. *Soil Sci.*, 85: 185-189.
- McINTYRE D.-S., 1958 b.-** Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.*, 85: 261-266.
- M'DELLA H., 1990.-** Etude de la répartition des apports et influence des paramètres morphométriques sur quelques barrages en Tunisie. Etude de cas de Béni Atta. Mém. Fin Etudes du Cycle de Spécialisation Conservation des Eaux et du Sol. INAT. 60 pages.
- MTIMET A., 1983.-** Contribution à l'étude pédologique des limons des Matmata (Sud tunisien). *Doctorat de spécialité*, 183 pages, Annexe, cartes h.t., E 590 *Direction des Sols*.
- MTIMET A., 1987.-** Evaluation de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique. Etude de simulation de pluies sur les sols d'un micro-bassin type jessour - Matmata Tunisie présaharienne. *Direction des Sols ES 240*, 51 pages.
- MTIMET A., PONTANIER R. et ASSELINE J., 1989.-** Une méthode de caractérisation en zone aride et semi-aride des états de surface élémentaires (1m<sup>2</sup>) soumises à des averses contrôlées. *Direction des Sols ES 245*, 17 pages.
- POSS R., PLEUVRET C. et SARAGONIH., 1991.-** Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridional). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV, n°4, 1989-90: 405-415.
- QUIRK J.-P., Schofield R.-K., 1955.-** The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *Soil Sci.*, 6, 163-178.
- QUIRK J.-P., 1978.-** Some physico-chemical aspects of soil structural stability. A review. In: *Modification of soil structure*. Emerson W.-W, Bond R.-D., Dexter A.-R. Edit. Wiley, Chichester - New York - Brisbane - Toronto, 3-16.
- RAATS P.-A. -C., 1974.-** Steady infiltration into crusted soils. *Proc. of the Xth Intern. Congr. of Soil Sci.*, Moscow, 1: 75-80.
- RIOU Ch., 1966.-** Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 5, pp.31-42.
- ROOSE E., 1980.-** Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse d'Etat, Univ. d'Orléans.
- ROOSE E., SARRAILH J.-M., 1990.-** Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelle d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV, n°1-2, 1989-90: 7-30.
- SHAINBERG I., 1984.-** The effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of sodic soils. In: *Soil salinity under irrigation. Processes and management*. 49-64.
- 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.