

# Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie)

## Mesures au laboratoire sous simulation de pluie

A. Douaoui<sub>(1)</sub>, C. Gascuel-Oudou<sub>(2)</sub> et C. Walter<sub>(2)</sub>

(1) Université Hassiba Benbouali, Laboratoire Eau-Environnement, BP 225 Chlef 02000, Algérie

(2) INRA - Agrocampus Rennes, UMR Sol-Agronomie-Spatialisation, 65 route de St Briec, 35042 Rennes Cedex

### RÉSUMÉ

L'aménagement de la plaine du Bas Chélif doit assurer une bonne gestion des sols. En effet, 80 à 85 % des sols de cette région sont touchés par des problèmes de salinité. Or les propriétés hydrodynamiques et l'érodibilité de ces sols sont mal connues. Pour pallier ce manque de connaissance, les six principaux types de sols de cette région ont été soumis à deux pluies simulées successives d'une heure à une intensité de 63 mm h<sup>-1</sup>. Il s'agit d'un Fluviosol, d'un Vertisol et de quatre Salisols de niveau de salinité croissante. Ces simulations de pluie ont été réalisées sur des agrégats de 3 à 5 mm de taille, disposés dans des bacs de 1 m<sup>2</sup>, présentant une pente de 4 %. Le ruissellement, l'infiltration, le drainage et les transferts de particules ont été mesurés. Les résultats de ces simulations de pluie discriminent bien les sols. Lors de la première pluie, le Fluviosol et le Salisol à sodicité moyenne (ESP de 6 %) présentent une forte infiltration, de l'ordre de 70 à 80 % de la pluie, le Vertisol et le Salisol à sodicité marquée (ESP de 10 %), une infiltration plus faible, de l'ordre de 40 % de la pluie, alors que les Salisols à sodicité élevée (ESP de 16 et 22 %) s'avèrent très sensibles au ruissellement, l'infiltration n'étant que de l'ordre de 15 à 30 % de la pluie. La hiérarchie des sols vis à vis de l'érosion est la même. Les flux de ruissellement sont étroitement liés aux tests de stabilité structurale, au taux de sodium échangeable, et dans une moindre mesure, à la conductivité électrique et à la teneur en matière organique.

### Mots clés

Salinité, sodicité, stabilité structurale, simulation de pluie, paramètres hydrodynamiques.

**SUMMARY****INFILTRABILITY AND ERODIBILITY OF SALT AFFECTED SOILS OF THE LOW CHELIFF VALLEY (ALGERIA).****Laboratory measurements under rainfall simulation**

More than 80 % of the soils of the Low Cheliff Valley (Algeria) are affected by salinity. To improve water management and salt removal, hydrodynamics properties and erodibility of the soils have to be studied. Infiltrability and erodibility of the six most representative soils of the Cheliff Valley have been measured. Two successive rainfall simulations have been applied during one hour with 63 mm h<sup>-1</sup> intensity on six soils : one Fluviosol, one Vertisol and four Salisols with different levels of soil sodicity. Rainfalls have been applied on 3 to 5 mm soil aggregates put in a 1 m<sup>2</sup> tray on a 4 % slope. Runoff, infiltration, drainage and particles transport have been monitored during the two simulated rainfalls. These two rainfalls allowed a good discrimination of the six soils. For the first rainfall, the Fluviosol and the Salisol with moderate sodicity (6 % ESP) presented high infiltration rates, about 70 to 80 % of the rainfall; by contrast, the Vertisol and the Salisol with noticeable sodicity (10 % ESP) presented lower infiltration rates, about 40 % of the rainfall, whereas the Salisols with very high sodicity were highly sensitive to runoff, with a low infiltration rates of about 15 to 30 % of the rainfall. The soil ranking was the same for soil erosion. The different runoff levels of the six soils were mainly explained by their structural stability and their exchangeable sodium content, and secondary, by their electrical conductivity and organic carbon content.

**Key-words**

Salinity, sodicity, structural stability, rainfall simulation, hydrodynamics parameters.

**RESUMEN****INFILTRABILIDAD Y ERODIBILIDAD DE LOS SUELOS SALINIZADOS DEL VALLE DEL BAJO CHELIFF (ARGELIA).****Medidas en el laboratorio bajo simulación de lluvia.**

El manejo del valle del Bajo Cheliff debe asegurar una buena gestión de los suelos. En efecto, 85 a 90 % de los suelos de esta región tienen problemas de salinidad. Ahora las propiedades hidrodinámicas y la erodibilidad de estos suelos son mal conocidas. Para contornear esta falta de conocimiento, los seis principales tipos de suelos de esta región fueron sometidos a dos lluvias simuladas sucesivas de una hora con una intensidad de 63 mm/h. Se trata de un Fluviosol, de un Vertisol y de cuatro Salisoles con niveles crecientes de salinidad. Estas simulaciones de lluvias fueron realizadas sobre agregados de tamaño de 3 a 5 mm, dispuestos en un recipiente de 1 m<sup>2</sup> que presenta una pendiente de 4 %. Se midieron el escurrimiento, la infiltración, el drenaje y las transferencias de partículas. Los resultados de estas simulaciones de lluvia discriminan bien los suelos. Durante la primera lluvia, el Fluviosol y el Salisol con sodicidad mediana (ESP de 6 %) presentan una fuerte infiltración, del orden de 70 a 80 % de la lluvia, el Vertisol y el Salisol con sodicidad marcada (ESP de 10 %), una infiltración más baja, del orden de 40 % de la lluvia, mientras que los Salisoles con sodicidad elevada (ESP de 16 a 22 %) resultan muy sensibles al escurrimiento, la infiltración siendo solamente del orden de 15 a 30 % de la lluvia. La jerarquía de los suelos en frente de la erosión es la misma. Los flujos de escurrimiento son estrechamente ligados a las medidas de estabilidad estructural, a la tasa de sodio intercambiable, y con menor importancia, a la conductividad eléctrica y a la tasa de materia orgánica.

**Palabras claves**

Salinidad, sodicidad, estabilidad estructural, simulación de lluvia, parámetros hidrodinámicos.

La préservation des sols de la salinisation et la restauration des sols salés requièrent une gestion de l'eau assurant une lixiviation régulière des sels de la solution du sol. Cette gestion de l'eau est difficile dans les sols salinisés et sodisés. Un pourcentage de sodium échangeable élevé entraîne une faible stabilité structurale (Agassi *et al.*, 1981; Valzano *et al.*, 2001; Vance *et al.*, 2002). Ces sols sont ainsi sensibles aux encroûtements de surface qui favorisent le ruissellement de surface (Rengasamy et Olsson, 1991; Crescimanno *et al.*, 1995; Mbagwu et Auerswald, 1999; Hachicha, 1998; Oster et Shainberg, 2001). Une prise en masse du sol peut également réduire fortement l'infiltration de l'eau dans le sol et conduire à une hydromorphie plus ou moins importante du sol selon sa texture et sa position topographique dans le paysage. Les teneurs élevées en sels tendent par ailleurs à augmenter la pression osmotique de la solution du sol, ce qui diminue la capacité de la plante à utiliser l'eau dont elle a besoin, au risque de la soumettre à une sécheresse conditionnée (Halitim, 1988). Seules les plantes tolérantes aux sels peuvent se développer. Dans certains cas, la salinité est tellement élevée que le sol devient stérile et dépourvu de toute végétation y compris de plantes halophytes. Dans ce cas, des problèmes de toxicité surviennent aussi; outre le sodium et le chlore, d'autres éléments à l'état de traces tels que le bore peuvent aussi être toxiques pour les plantes (Ayers et Westcot, 1988).

La dynamique des sels dans le sol est liée au fonctionnement hydrique et structural des sols, aux conditions hydriques et géochimiques aux limites du profil de sol, soit principalement à l'apport d'eau d'irrigation et aux fluctuations de nappe. Une irrigation fréquente est souvent nécessaire du fait du déficit hydrique des sols. Cette irrigation apporte une eau plus ou moins salée. Elle fait fluctuer le niveau piézométrique d'une nappe souvent proche de la surface. La nappe contribue à la remontée des sels dans le profil de sol, soit par capillarité, soit au cours de remontées significatives lors de grandes crues. La lixiviation des sels par drainage est nécessaire pour évacuer les sels hors du système racinaire des plantes. Elle doit se faire en contrôlant le niveau de la nappe en deçà d'un niveau critique. Cette gestion ne peut être convenablement menée sans connaissances des caractéristiques hydrodynamiques des sols, liées de manière complexe dans les sols salés, aux caractéristiques physiques et chimiques des sols. Ces relations, encore mal établies et comprises, nécessitent des mesures sur les sites touchés par la salinité et la sodicité.

L'objectif premier de ce travail est de quantifier et de comparer l'infiltrabilité et l'érodibilité de différents types de sols de la vallée du Bas Chélif, pour hiérarchiser les situations. Cette région n'a fait l'objet d'aucune investigation sur ce thème, à l'exception des travaux de Saidi (1992), très récemment de Saidi *et al.* (2004). Il s'agit ainsi de hiérarchiser les sols sur la base de mesures, afin d'éviter de mettre en valeur des sols mal drainés et dégradés, mettant inutilement en jeu des moyens et risquant une stérilisation accrue de certains sols. Ce travail a aussi un objectif plus général, celui de contribuer à l'établissement des relations entre les caractéristiques hydrody-

namiques et physico-chimiques des sols salés, en s'appuyant sur un contexte donné, celui du Bas Chélif,

## MATERIEL ET METHODES

### Site expérimental

La plaine du Bas Chélif, située à 220 km à l'ouest d'Alger, s'étend d'Est en Ouest sur une cinquantaine de km de long et une superficie de plus de 400 km<sup>2</sup>. Le climat est semi-aride avec une pluviométrie annuelle moyenne de 280 mm répartie essentiellement entre octobre et mars. La pluie journalière maximale de ces dix dernières années est en moyenne de 25 mm pour les mois décembre et janvier, alors que la pluviosité moyenne sur ces deux mois est de 44 mm. A cette période, la nappe se trouve parfois à moins de 2 m de profondeur. Elle est très chargée, avec une conductivité électrique comprise entre 12 et 58 dS m<sup>-1</sup>.

Cette plaine est considérée comme une zone à haut potentiel agricole au vu de l'étendue des terres irrigables et de la disponibilité en eau pour l'irrigation. Cet atout est limité par une extension importante des sols salés qui touche aussi bien des zones irriguées que non irriguées. L'enjeu du développement agricole de cette plaine est de préserver les terres non salées et d'aller vers la récupération de milliers d'hectares déjà touchés par la salinisation. Selon la classification USSS Staff (1954), environ 60 % des sols de la plaine du Bas Chélif sont classés parmi les sols salés à très salés, 20 à 25 % font partie des sols moyennement salés; seuls 15 à 20 % des sols sont considérés comme non salés (Walter *et al.*, 2001; Douaoui et Walter, 2002). Cette salinisation s'accompagne le plus souvent d'une augmentation du taux de sodium échangeable (Boulaine, 1957; Durand, 1958; Daoud, 1993; Daoud, 1999; Douaoui *et al.*, 2001), ce qui conduit à des modifications de l'état structural des sols, notamment des couches de surface (Saidi *et al.*, 1999; Douaoui et Walter, 2002).

Les études agro-pédologiques de cette région (Boulaine, 1957; Durand, 1958; Daoud, 1993; Daoud *et al.*, 1993; Saidi *et al.*, 1999; Douaoui *et al.*, 2001) ont montré que les sols sont calcaires, de texture fine le plus souvent. La composition minéralogique est complexe, formée d'interstratifiés smectite-illite, de kaolinite ainsi que de chlorite, vermiculite, quartz, calcite et complexes amorphes (Daoud et Robert, 1992). Ces sols présentent une sodicité quelquefois marquée, une hydromorphie temporaire liée aux périodes pluvieuses et localisée dans des dépressions nombreuses et plus ou moins étendues (McDonald - BNEDER, 1990). En plus du calcium, ces sols présentent de fortes teneurs en magnésium (Durand, 1958; Daoud *et al.*, 1993).

La carte des sols établie par McDonald (BNEDER, 1990) a servi de base au choix des sites. Six sites représentant les principaux types de sols de la plaine du Bas Chélif ont été retenus. Ces sites comprennent selon le référentiel pédologique (AFES, 1995):

un Fluviosol, un Vertisol et quatre Salisols à sodicité croissante (salé-Na1, salé-Na2, salé-Na3, salé-Na4). Ces sites correspondent respectivement à des sols peu évolués d'apport alluvial, Vertisol et sols halomorphes à structure non dégradée et dégradée selon la CPCS (1967).

Sur chacun de ces six sites, des prélèvements de sol, en volume important, ont été réalisés à la bêche, dans les couches de surface, entre 2 et 20 cm de profondeur. Ces prélèvements ont eu lieu en début de période sèche (mai). Les mesures au laboratoire ont débuté au cours du même mois, après préparation des échantillons.

## Caractérisation des sols étudiés

Les constituants, les propriétés hydrodynamiques et structurales ont été déterminés sur trois répétitions par site. Seule la valeur moyenne est présentée ici (tableau 1).

Un échantillon par site, provenant du même prélèvement, séché à l'air et tamisé à 2 mm, a été utilisé pour déterminer les constituants du sol. La texture a été déterminée, après décarbonatation, par sédimentation à la pipette de Robinson. La teneur en matière organique a été mesurée par analyse du carbone total après oxydation sulfochromique. Le calcaire total ( $\text{CaCO}_3$ ) a été mesuré par la méthode gazovolumétrique en utilisant le calcimètre de Bernard. Le pH a été mesuré dans une solution du sol de rapport 1 :2,5. La salinité a été mesurée par la conductivité électrique de l'extrait aqueux de la pâte saturée du sol (CEe) à 25 °C (USSS Staff, 1954). La sodicité, déduite du taux de sodium échangeable (ESP), a été mesurée par la méthode de l'acétate d'ammonium à pH 7 par percolation sur colonne après lavage des sels à l'éthanol.

La conductivité hydraulique saturée ( $K_s$ ) a été déterminée, sur la base de l'équation de Darcy, sur une colonne de sol saturé de 9 cm de hauteur et 2,5 cm de diamètre, présentant une lame d'eau de 2 cm de hauteur, comportant des agrégats calibrés de 0,2 à 2 mm. La stabilité structurale a été mesurée à partir de deux des tests proposés par Le Bissonnais (1996). Ces deux tests ont été réalisés sur des agrégats calibrés entre 3 et 5 mm ; l'un porte sur l'humectation rapide ( $\text{MWD}_1$ ), l'autre sur une agitation mécanique après pré-traitement à l'alcool pour réduire l'éclatement ( $\text{MWD}_2$ ). Ces deux tests identifient la sensibilité des sols à respectivement des processus d'éclatement et des processus de désagrégation mécanique. Le troisième test, test à humectation lente, peu significatif des conditions de terrain (Saidi *et al.*, 1999), n'a pas été pris en compte. Pour la conductivité hydraulique comme pour les tests de stabilité structurale, le conditionnement des sols par agrégat permet plus de comparer les sols que de prédire leur fonctionnement en situation de terrain.

## Simulation de pluie

Après un séchage à l'air du sol, des agrégats de taille comprise entre 3 et 5 mm ont été fabriqués à partir de tamis calibrés : la totalité du sol a été forcée à travers un tamis de 5 mm ; le surplus

recueilli sur un tamis de 3 mm a été conservé. Les agrégats ont été placés dans un bac de 1 m<sup>2</sup> sur une épaisseur de 2,4 cm, posés sur une couche de 1 cm de sables grossiers calibrés (1-2 mm) et une couche de 2 cm de graviers. L'utilisation d'agrégats calibrés permet d'analyser les processus de ruissellement et d'érosion dans des conditions structurales similaires pour les différents types de sols. Cette expérimentation doit plus être considérée comme un test que comme la simulation du ruissellement dans des conditions de terrain. L'utilisation de pluies simulées sur des massifs d'agrégats a fait l'objet d'autres études (Boiffin, 1984 ; Le Bissonnais *et al.*, 1989 ; Bresson et Cadot, 1992 ; Fiès et Panini, 1995).

Un simulateur IRD (Institut de Recherche et Développement) (Asseline et Valentin, 1978) a été utilisé. Il comporte une buse d'aspersion, fixée à un portique haut de trois mètres et demi, et animée d'un mouvement pendulaire dû à un moteur électrique. Cette buse arrose une surface délimitée. La simulation a été effectuée en laboratoire sur un bac calibré de 1 m<sup>2</sup> dont la pente est de 4 %. Deux pluies successives, avec une eau non salée, d'une intensité de 63 mm h<sup>-1</sup> et d'une durée de 60 mn ont été appliquées. Un temps de ressuyage de 24 heures sépare ces deux pluies. L'état de surface n'a pas été modifié entre les deux pluies. Il n'y a pas eu de répétitions par type de sol.

Les conditions expérimentales ont été choisies en relation avec les conditions de terrain. La pente de 4 % correspond à la pente moyenne de la plaine. L'intensité de pluie de 63 mm h<sup>-1</sup> est supérieure à celle des conditions naturelles. Elle correspond cependant à des flux d'eau proches des conditions d'irrigation. L'évapotranspiration dépassant en moyenne les 1500 mm an<sup>-1</sup>, les besoins en irrigation sont très élevés durant la saison sèche. L'apport par irrigation varie entre 50 et 60 mm, selon une fréquence allant de 4-5 jours jusqu'à 25 jours. L'irrigation de la pomme de terre se fait essentiellement par aspersion, celle sur cultures maraîchères et agrumes est gravitaire. Les céréales sont en général peu ou pas irriguées. La simulation de pluie est donc comparable, en terme quantitatif, à l'irrigation de la pomme de terre. Elle diffère cependant en terme de qualité d'eau. L'irrigation utilise en général une eau salée d'origine souterraine alors que l'eau des barrages, moins chargée, n'est disponible que durant la période estivale. Les deux pluies simulées successives permettent d'obtenir une réponse du sol à une pluie, dans des conditions hydriques et structurales différentes, correspondant respectivement : au début, à un état sec et une structure d'agrégats ; au bout d'une heure de pluie et d'un ressuyage de 24 heures, à un état humide et une structure différente, dégradée tant en surface que sur l'ensemble du sol.

Les eaux ruisselées et drainées ont été collectées manuellement durant un temps précis de 15 secondes, toutes les minutes, ceci durant toute l'heure de simulation de pluie. La concentration en particules solides du ruissellement a été mesurée à partir de prélèvements d'eau réalisés toutes les 5 minutes, la mesure se faisant après passage à l'étuve. Les hydrogrammes du ruissellement et de l'infiltration ont été établis. Différents paramètres ont été calculés sur chacune des deux pluies simulées : la pluie d'imbibition ( $\text{Pi}$ ), expri-

**Tableau 1** - Caractéristiques des six sols étudiés (moyenne sur 3 répétitions). Teneur en argile (Arg), en limons (Lim), en sables (Sab), en matière organique (MO), en carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ); conductivité électrique à pâte saturée (CEe), sodicité (ESP), stabilité structurale (MWD1 pour le test d'éclatement et MWD2 pour le test d'énergie mécanique), conductivité hydraulique saturée (Ks).

**Table 1** - Characteristics of the six studied soils (mean on three replicates). Clay (Arg), silt (Lim), sand (Sab), organic matter (MO) and carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) content; electric conductivity (CEe), sodicity (ESP), aggregate stability for slaking test (MWD1) and for mechanical breakdown test (MWD2), saturated hydraulic conductivity (Ks).

	Arg. (%)	Lim. (%)	Sab. (%)	MO g kg <sup>-1</sup>	CE dS m <sup>-1</sup>	ESP (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	pH	MWD1 (mm)	MWD2 (mm)	Ks (mm h <sup>-1</sup> )
Fluvisol	46	39	14	19,8	0,9	1,6	21	7,7	2,06	2,14	106
Vertisol	55	36	8,5	17,2	1,4	3,4	10	8	0,83	0,97	25
Salé-Na1	44	36	19	21,3	10,5	6,3	16	7,8	0,94	1,38	56
Salé-Na2	48	40	12	18,0	6,8	9,6	19	8,1	0,84	1,10	40
Salé-Na3	48	38	13	16,5	14,5	16	21	8,1	0,50	0,61	2
Salé-Na4	50	47	2,3	11,5	20	22	14	8,3	0,43	0,47	5

mée en mm, correspond à la lame d'eau apportée avant ruissellement; la lame ruisselée (Lr), mesurée directement, exprimée en mm et en pourcentage de la quantité de pluie apportée; la lame infiltrée (Inf), estimée par différence entre la lame apportée et la lame ruisselée, exprimée en mm et en pourcentage de la quantité de pluie apportée; la lame drainée (Dr) mesurée, exprimée en mm; la variation de stock d'eau dans le sol (iS), estimée par différence entre la lame infiltrée et la lame drainée, exprimée en mm; le ruissellement en régime permanent (Rx), exprimé en mm h<sup>-1</sup>; l'infiltration en régime permanent (Fn), exprimée en mm h<sup>-1</sup>; la concentration en particules solides en régime permanent (MS) exprimée en g l<sup>-1</sup>; le flux cumulé de particules solides pour l'ensemble de la pluie (FCPS), exprimé en g m<sup>2</sup>. L'état de surface a fait l'objet d'observations visuelles. L'épaisseur de la croûte a été mesurée avec un pied à coulisse à la fin de la simulation une fois le sol redevenu sec.

## RÉSULTATS

### Caractéristiques physiques et chimiques des sols

Les caractéristiques physiques et chimiques des sols sont regroupées dans le *tableau 1*. Les sols sont tous de texture argileuse à argilo-limoneuse. La teneur en MO est faible, comprise entre 11,5 et 21 g. kg<sup>-1</sup>. Selon la classification USSS Staff (1954), la CEe indique que le Fluvisol et le Vertisol ne sont pas salins, alors que les quatre autres sols ont une salinité variable, moyenne pour salé-Na2, élevée pour salé-Na1, très élevée pour salé Na3 et Na4 (*tableau 1*). L'ESP présente des faibles valeurs pour les sols non salés. Il dépasse le seuil des 15 % pour les sols salés Na3 et Na4. Le calcaire total présente des valeurs moyennes pour tous les sols. Le pH dépasse la valeur de 7,5 pour tous les sols, ce qui les place

dans les sols alcalins. Les tests de stabilité structurale indiquent une bonne stabilité structurale pour le Fluvisol et le sol salé-Na1 (MWD > 1 mm), une stabilité structurale médiocre à faible, du salisol-Na2 et du Vertisol aux sols salés Na3 et Na4 (*tableau 1*). Dans tous les cas, les sols sont plus sensibles à l'éclatement qu'à la désagrégation mécanique, MWD<sub>1</sub> étant toujours inférieur à MWD<sub>2</sub>. Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation suivent la même tendance. La conductivité hydraulique à saturation, forte pour le Fluvisol, diminue jusqu'aux sols très salés et très sodiques de très faible perméabilité.

### Simulation de pluie sur sol sec et à structure d'agrégats

#### Caractéristiques hydrodynamiques des sols

La pluie d'imbibition (Pi), volume d'eau infiltré dans le sol avant ruissellement, atteint 32,5 mm pour le Fluvisol, soit plus de la moitié de l'averse totale, alors qu'elle n'est que de 4,2 mm, soit 5 % de l'averse totale pour le sol salé-Na4 (*tableau 2*). Les pluies d'imbibition du sol salé-Na1, du sol salé-Na2, du Vertisol et du sol salé-Na3 présentent des valeurs intermédiaires, de respectivement 26,5 mm, 14,7 mm, 9,4 mm et 7,3 mm. La pluie d'imbibition, donc le temps de submersion, varie fortement d'un sol à l'autre, dans un rapport proche d'un à dix.

Les lames ruisselées et les coefficients de ruissellement augmentent de même, du Fluvisol au Salisol-Na4, en passant progressivement par les sols salés Na1 et Na2, le Vertisol, les sols salés Na3 et Na4, à l'inverse des lames infiltrées et des coefficients d'infiltration (*tableau 2*).

Alors que la lame drainée augmente avec l'infiltration pour l'ensemble des sols, la quantité d'eau retenue par le sol (iS) varie très peu d'un sol à l'autre (*tableau 2*). La part relative du drainage et de

**Tableau 2** - Valeurs caractéristiques de la première simulation de pluie sur sol sec et à structure d'agrégats. Pi: pluie d'imbibition; Lr: lame ruisselé; Inf: infiltration; Dr: lame drainée;  $\Delta S$ : eau retenue par le sol; Ki: coefficient d'infiltration; Kr: coefficient de ruissellement; Rx: ruissellement en régime permanent; Fn: infiltration en régime permanent; MS: concentration en particules solides; FCPS: Flux cumulé de particules solides.

**Table 2** - Characteristics of the first rainfall simulation on dry and aggregated soil. Pi: imbibition rainfall; Lr: overland flow; Inf: infiltration; Dr: drained water;  $\Delta S$ : soil water storage; Ki: infiltration rate; Kr: runoff rate; Rx: runoff rate at steady state; Fn: infiltration rate at steady state; MS: sediment concentration; FCPS: cumulative flow of solid particles.

	Pi (mm)	Lr (mm)	Inf (mm)	Dr (mm)	$\Delta S$ (mm)	Ki (%)	Kr (%)	Rx (mm h <sup>-1</sup> )	Fn (mm h <sup>-1</sup> )	MS (g l <sup>-1</sup> )	FCPS (g m <sup>-3</sup> )
Fluvisol	32,5	12,3	50,7	35,8	14,9	80	20	-	-	11,0	135
Vertisol	9,4	38,3	24,7	12,4	12,3	40	60	52,7	10,3	18,7	716
Salé-Na1	26,5	19,4	43,6	30,9	12,6	69	31	-	-	8,9	173
Salé-Na2	14,7	36,5	26,5	14,2	12,4	42	58	54,5	8,5	13,4	489
Salé-Na3	7,3	45,4	17,6	6,7	10,9	28	72	53,8	9,2	18,5	840
Salé-Na4	4,2	53,4	9,6	0,7	8,9	15	85	58,5	5,5	17,3	924

l'eau stockée, parmi l'eau infiltrée, varie donc sensiblement selon les sols. Le drainage représente 70 % de l'infiltration pour le Fluvisol et le sol salé-Na1 alors qu'il représente moins de 10 % pour le sol salé-Na4.

La concentration en particules solides est faible pour le Fluvisol et le sol salé-Na1, avec une moyenne de 10 g l<sup>-1</sup>. Pour le Vertisol et les sols salé-Na3 et sol salé-Na4, cette concentration atteint une moyenne de 18 g l<sup>-1</sup>. Le flux cumulé de particules solides augmente corrélativement au ruissellement (tableau 2).

### Dynamiques des écoulements

On distingue deux groupes de sols (figure 1). Un premier groupe, comprenant le Fluvisol et le sol salé-Na1, pour lequel le ruissellement et l'infiltration n'atteignent pas de régime permanent au cours des 60 mn de la première simulation. Dans ce premier groupe, on observe une longue phase d'imbibition et un drainage important. Un second groupe, comprenant le Vertisol, les sols salés Na2, Na3 et Na4, pour lequel les régimes permanents sont atteints plus ou moins rapidement.

Dans le premier groupe, l'infiltrabilité est supérieure à l'intensité de la pluie durant toute une phase d'imbibition. Cette phase correspond dans un premier temps à une humectation totale du sol, puis partielle, au profit du drainage. Le drainage augmente d'abord rapidement puis plus lentement, plus rapidement sur le sol salé-Na1 que sur le Fluvisol, indiquant une humectation de plus en plus faible du sol. A l'approche d'un régime stationnaire de drainage égal à l'intensité de la pluie, le ruissellement démarre. Dans cette deuxième phase, l'infiltration et le drainage diminuent progressivement au profit du ruissellement. Cette diminution est linéaire pour le Fluvisol, plus abrupte pour le sol salé-Na1. Pour ce dernier, un régime permanent de ruissellement semble s'établir autour de 50 mm h<sup>-1</sup>, valeur légèrement supérieure à la valeur finale atteinte par le Fluvisol, de 44 mm h<sup>-1</sup>. Dans cette phase, l'intensité du drainage diminue avec

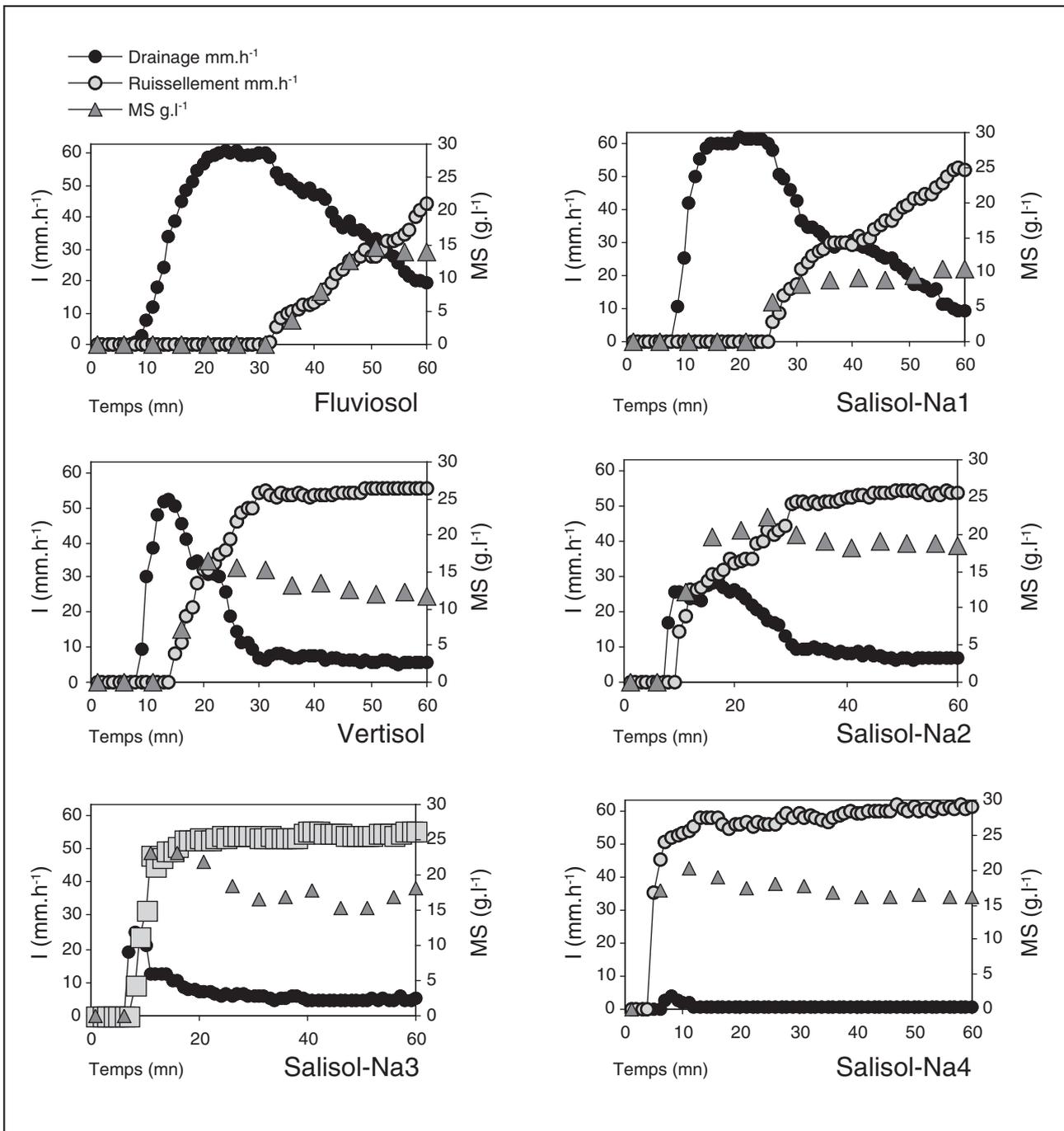
l'infiltration.

Dans le deuxième groupe, la dynamique est la même, mais avec une première phase plus courte, des transitions plus marquées. Le sol salé-Na2 présente la plus longue phase d'imbibition. A la fin de cette phase, le ruissellement croît rapidement, jusqu'à atteindre un régime permanent, très rapidement pour le sol salé-Na4, un peu moins rapidement pour le sol salé-Na2, le Vertisol et le sol salé-Na3. Pour ces trois derniers sols, le drainage apparaît avant le ruissellement, alors que pour le sol salé-Na4, le drainage ne se déclenche qu'après le début du ruissellement et reste très faible tout au long de la simulation.

### Simulation de pluie sur sol humide et à structure dégradée

Les valeurs des paramètres liés à l'infiltration (Inf, Pi, Dr, Ki,  $iS$ ) présentent tous et pour tous les sols, des valeurs plus faibles que pour la simulation à l'état sec (tableau 3). Ces paramètres hydrodynamiques hiérarchisent les sols de façon identique à la première simulation (tableau 2). La concentration en particules solides varie peu par comparaison à la première simulation de pluie. Elle est plus élevée que celle mesurée lors de la première simulation pour le Fluvisol et le sol salé-Na1, plus faible pour les autres types de sols.

Les dynamiques d'écoulement au cours du temps sont semblables, tant pour l'infiltration que pour le ruissellement (figure 2). Elles présentent toutes un régime d'écoulement permanent. La phase d'imbibition (Pi) est très réduite et ne dure que quelques secondes pour les six sols. La seconde phase marquant le début du ruissellement et allant jusqu'à l'instauration d'un régime permanent ne dure que quelques minutes pour le Fluvisol. Elle est quasi inexistante pour les autres sols. Le drainage, déclenché plus tardivement par rapport à la première simulation, présente une intensité beaucoup plus faible. Il est presque nul dans le cas des sols salés Na3 et Na4.

**Figure 1** - Dynamique des flux d'eau et de particules lors d'une simulation de pluie sur des agrégats de sol sec.**Figure 1** - Dynamic of water and particles during a rainfall simulation on dry soil aggregates.

### Etat de surface

L'état de surface des six types de sol a varié dès les premières minutes de la simulation. Des différences importantes de comportement sont observées entre les Fluvisol et sol salé-Na1 d'une part, et les sols salés Na3 et Na4 d'autre part. Pour les premiers, la dimi-

nution de la rugosité, à partir d'une simple observation, n'a été nette qu'à partir de la 20<sup>e</sup> minute de la simulation à l'état sec, alors qu'elle a débuté dès la 10<sup>e</sup> minute pour les deux autres sols. Une demi-heure après le début de la première simulation, le dépôt des particules est devenu apparent à l'aval des bacs indiquant le début

**Tableau 3** - Valeurs caractéristiques de la seconde simulation de pluie sur le sol à l'état humide et à structure dégradée.

Pi : pluie d'imbibition; Lr : lame ruisselée; Inf : infiltration; Dr : lame drainée;  $\Delta S$  : eau retenue par le sol; Ki : coefficient d'infiltration; Kr : coefficient de ruissellement; Rx : ruissellement en régime permanent; Fn : infiltration en régime permanent; MS : Matière en suspension; FCPS : Flux cumulé de particules solides.

**Table 3** - *Tableau 3- Characteristics values of the second rainfall simulation, following a first one after a 24h drying period. Pi : imbibition rainfall; Lr : overland flow; Inf : infiltration; Dr : drained water;  $\Delta S$  : soil water storage; Ki : infiltration rate; Kr : runoff rate; Rx : runoff rate at steady state; Fn : infiltration rate at steady state; MS : sediment concentration; FCPS : cumulative flow of solid particles.*

	Pi (mm)	Lr (mm)	Inf (mm)	Dr (mm)	$\Delta S$ (mm)	Ki (%)	Kr (%)	Rx (mm h <sup>-1</sup> )	Fn (mm h <sup>-1</sup> )	MS (g l <sup>-1</sup> )	FCPS (g m <sup>-3</sup> )	EpC (mm)
Fluvisol	1,0	47,6	15,2	8,0	7,2	24,2	76,6	48,8	14,2	14,3	680	1,8
Vertisol	0,5	54,6	8,4	1,2	7,2	13,3	86,7	55,9	7,1	14,6	722	1,9
Salé-Na1	0,8	50,3	12,7	5,4	7,3	20,1	79,9	51,5	11,5	13,4	674	2,2
Salé-Na2	0,5	52,7	10,3	2,9	7,3	16,3	73,7	54,1	8,9	13,1	690	2,4
Salé-Na3	0,5	55,6	7,4	0,64	6,7	10,7	89,3	56,7	6,3	13,0	797	2,6
Salé-Na4	0,5	58	5,0	0,4	4,6	8,0	92	59,0	4,0	15,4	893	2,6

de la formation de croûtes sédimentaires pour les sols salés Na3 et Na4. Pour le Fluvisol et le sol salé-Na1, le développement de la croûte sédimentaire n'intervient que vers la fin de la première simulation. Cette différence d'état de surface a été maintenue jusqu'à la fin de la simulation à l'état sec. A la fin de la simulation à l'état humide, les mesures de l'épaisseur des croûtes de surface à l'aval du bac ont montré des valeurs proportionnelles aux lames ruisselées et aux flux cumulés des particules solides (tableau 3).

## DISCUSSION

### Conditions expérimentales

Les résultats obtenus dans ces expériences peuvent difficilement être transposés en terme quantitatif à la réalité de terrain du fait de conditions expérimentales de laboratoires très différentes : structure reconstituée du sol, faible profondeur du massif, qualité chimique de l'eau apportée différente, forte pluviométrie. Une seule expérience par sol a été réalisée, limitant la portée des résultats. Enfin, les deux simulations de pluie diffèrent par les conditions hydriques mais aussi structurales et géochimiques. L'apport massif d'eau non saline lors de la première pluie contribue à lessiver les sels solubles et ainsi à diminuer très rapidement la conductivité électrique de la solution du sol. Il peut aussi contribuer à réduire la sodicité (Sumner, 1993). En conséquence, l'état initial des sols lors des deux pluies successives diffère bien au-delà de la teneur en eau, par leurs propriétés physico-chimiques et leurs caractéristiques structurales et hydrodynamiques. Une approche de la dynamique chimique des différents types écoulements aurait permis d'approfondir ce point. A défaut la discussion abordera : 1) la nature des relations entre les caractéristiques

physiques et chimiques des sols et les flux; 2) la hiérarchisation des sols et les hypothèses pour l'expliquer.

### Relation entre les caractéristiques des sols et le ruissellement

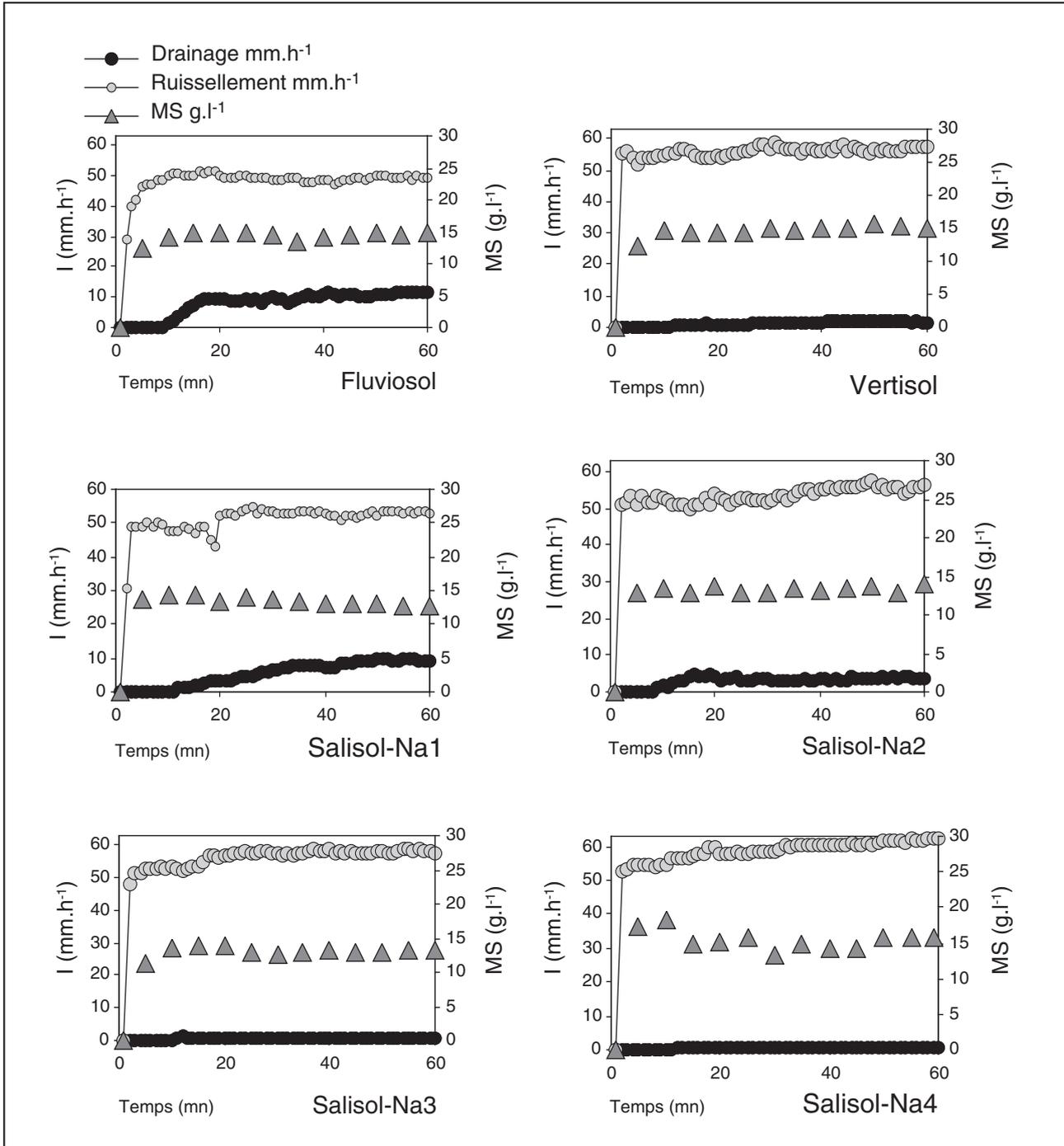
Quelle que soit la simulation de pluie, le ruissellement est d'autant plus faible que la teneur en MO est élevée d'une part, que la CEe et l'ESP sont faibles d'autre part, excepté pour le Vertisol. Trois variables semblent donc jouer un rôle clé : la teneur en MO, l'ESP, et dans une moindre mesure, la CEe (figure 3).

La matière organique semble avoir un effet positif sur le ruissellement (Tisdall et Oades, 1982; Barzegar *et al.*, 1997). Cette relation entre la teneur en matière organique et le ruissellement est établie pour des gammes de teneurs en matière organique très faibles, sur peu de points, ce qui relativise la portée de ce résultat. Goldberg (1988) puis Sumner (1993) ont trouvé que le carbone organique, même à des teneurs inférieures à 1 %, a une influence sur la dispersion des argiles dans les zones arides. Daoud (1999) a également trouvé une corrélation positive significative entre le taux de la matière organique et les agrégats stables au benzène. Cette relation mériterait d'être approfondie et découplée des variations de l'ESP pour être confortée (figure 4).

L'influence de la concentration saline et du sodium échangeable sur les propriétés physiques et le ruissellement a fait l'objet de nombreuses études (Sumner, 1993). Leur action simultanée, et souvent opposée, très variable d'un sol à l'autre, ne facilite pas l'évaluation du rôle de ces deux paramètres. Les travaux montrent en général que la concentration saline contribue à améliorer la structure par floculation des argiles, alors que le sodium échangeable contribue à sa dégradation par dispersion des argiles (Benhur *et al.*, 1985; Sumner, 1993; Oster et Shainberg, 2001). Cette dispersion met en

**Figure 2 -** Dynamique des flux d'eau et de particules lors d'une seconde simulation de pluie, faisant suite à une première sur sol sec et agrégé, suivi de 24 h de ressuyage.

**Figure 2 -** Dynamic of water and particles during a second rainfall simulation, following a first one after a 24h drying period.

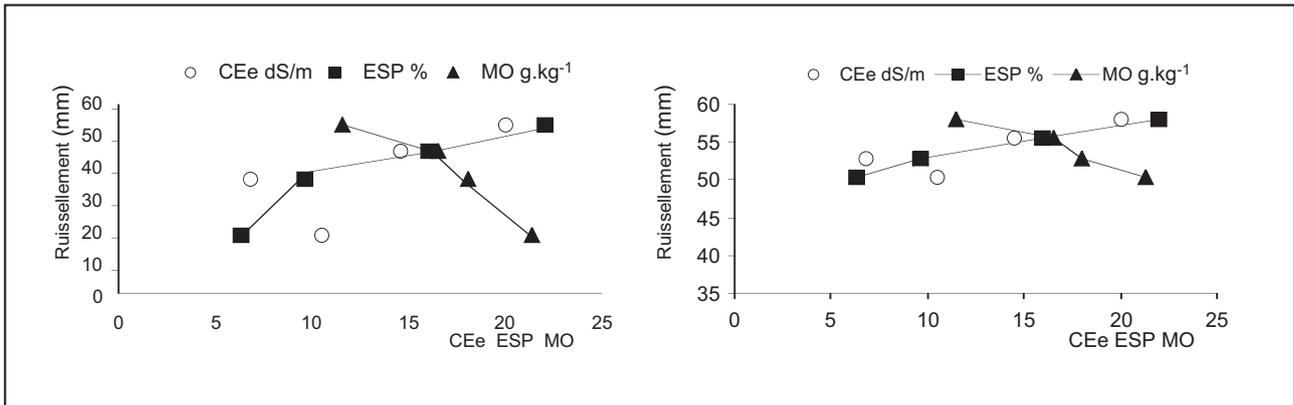


suspension des particules conduisant à la fermeture de la porosité, à une réduction de l'infiltration et une augmentation du ruissellement (Oster and Schroer, 1979; Kazman *et al.*, 1983; Farres, 1987; Römken *et al.*, 2001). Les résultats obtenus ici sont conformes à

ces travaux puisque le ruissellement est significativement lié au sodium échangeable. Dans la situation du Bas Chélif, la forte concentration saline, exprimée par la C<sub>EE</sub>, ne s'oppose pas à l'action défloculante du sodium échangeable, du moins aux salinités pré-

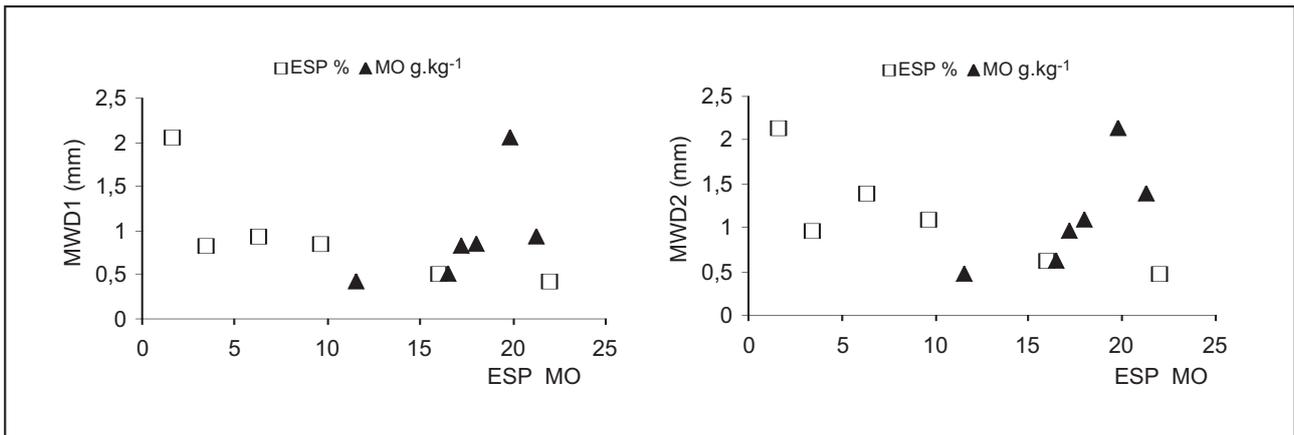
**Figure 3** - Ruissellement (mm) en fonction des caractéristiques des sols : teneur en matière organique (MO en g. kg<sup>-1</sup>), conductivité électrique à pâte saturée (CEe en dS. m<sup>-1</sup>), sodicité (ESP en %), sur deux simulations de pluie successives.

**Figure 3** - Runoff (mm) versus soil characteristics : organic matter content (MO in g. kg<sup>-1</sup>), electric conductivity (CEe in dS. m<sup>-1</sup>), sodicity (ESP in %), on the two successive rainfall simulations.



**Figure 4** - Diamètre moyen des agrégats issus de tests de stabilité structurale : MWD<sub>1</sub> (mm) pour le test d'éclatement, MWD<sub>2</sub> (mm) pour le test de désagrégation mécanique, en fonction de la teneur en matière organique (MO g. kg<sup>-1</sup>) et de la sodicité (ESP en %) des sols.

**Figure 4** - Mean weighted diameter of aggregates resulting from aggregate stability tests : MWD<sub>1</sub> (mm) for slaking test, MWD<sub>2</sub> (mm) for mechanical breakdown test, versus soil organic matter content (OM g. kg<sup>-1</sup>) and sodicity (ESP in %).



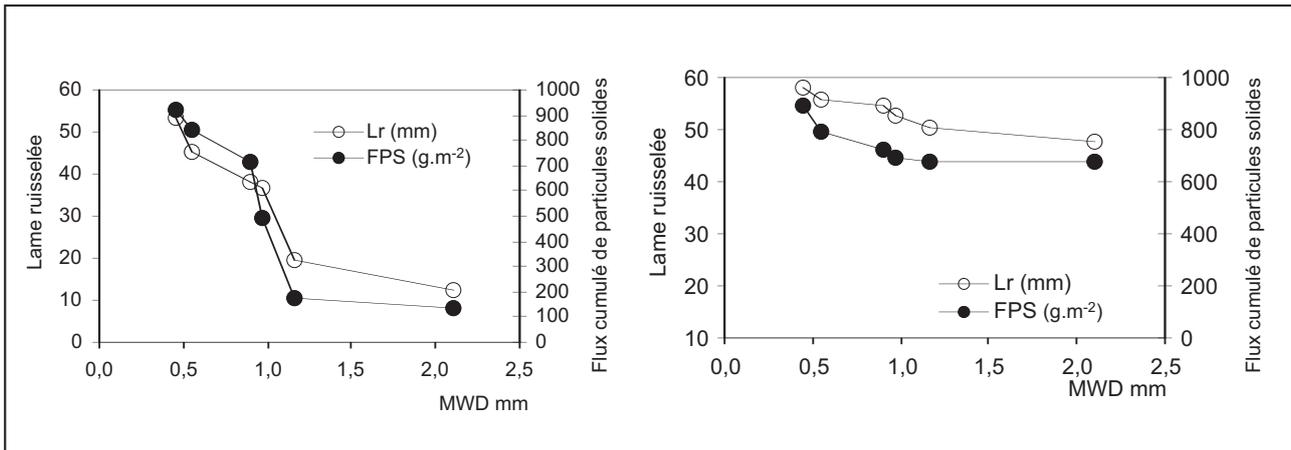
sentées ici (figure 4). Ceci est lié au fait que, dans la région d'étude, l'augmentation de la CEe s'accompagne le plus souvent d'une augmentation simultanée du sodium échangeable, comme le montrent ces résultats ainsi que ceux de Daoud (1999). Ceci conduit à faire de la salinité, de manière paradoxale, et pour le contexte du Bas Chéouf, un paramètre indicateur de la sensibilité au ruissellement (Saidi, 1992 ; Saidi *et al.*, 2004). Ceci est intéressant car c'est un paramètre facile d'accès. Cet indicateur a des limites puisque le sol salé-Na1, avec une CEe élevée de 10,5 dS m<sup>-1</sup> et un ESP moyen de 6,3 %, présente un ruissellement faible (31 %), comparé aux autres sols (61 % en moyenne sur l'ensemble des Salisols). Les lames ruisselées plus élevées, obtenues pour les sols de CEe plus faible (sol salé-Na2, Vertisols),

sont clairement dues à leur taux de sodium échangeable (sol salé-Na2) ou leur fragilité de structure (Vertisol). Le sodium échangeable apparaît donc bien comme le paramètre explicatif déterminant de la sensibilité au ruissellement.

Ainsi, dans le cas du Bas Chéouf, la forte concentration saline de la solution du sol en sels neutres (chlorures et sulfates) combinée aux proportions élevées en calcaire a tendance à maintenir la flocculation des argiles et la formation d'agrégats. Lorsque la sodicité augmente, les résultats obtenus ici, comme certaines observations de terrain, montrent que ce n'est plus le cas. Certains sols présentent une structure très dégradée. Celle-ci se manifeste à la surface par une structure défloculée poudreuse surmontée parfois par une mince pellicule glacée. Ces sols dénommés par Boulaine (1957)

**Figure 5** - lame ruisselée ( $L_r$  mm) et flux cumulé de particules solides (FPS  $g \cdot m^{-2}$ ) pour les deux simulations de pluies successives, en fonction du diamètre moyen des agrégats issus de tests de stabilité structurale (moyenne des diamètres des tests d'éclatement et d'énergie mécanique).

**Figure 5** - Runoff ( $L_r$  mm) and cumulative solid particles flux (FPS  $g \cdot m^{-2}$ ) for two successive rainfall simulations, versus mean diameter of aggregates resulting from aggregate stability tests (mean between diameters of slaking and mechanical breakdown test).



« Solontchak vif défloculé », correspondent aux sols salé-Na3 et salé-Na4. Ils sont beaucoup plus fréquents aujourd'hui qu'ils ne l'étaient dans les années cinquante ; on les retrouve le plus souvent sur des sols anciennement cultivés.

Les tests de stabilité structurale permettent bien d'évaluer la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion, pour les deux simulations (figure 5), appuyant les résultats de Saidi *et al.* (2004). Dans la simulation à l'état sec, les sols sont très bien discriminés, le ruissellement et l'érosion linéairement liés (Casenave et Valentin, 1989). Dans la simulation à l'état humide, c'est également le cas, mais avec des lames d'eau ruisselées plus élevées, des variations plus faibles d'un sol à l'autre, des relations non linéaires entre le ruissellement et l'érosion. Quand la croûte de surface est formée, que le sol a acquis une structure stable, l'érodibilité des sols s'uniformise (figure 5).

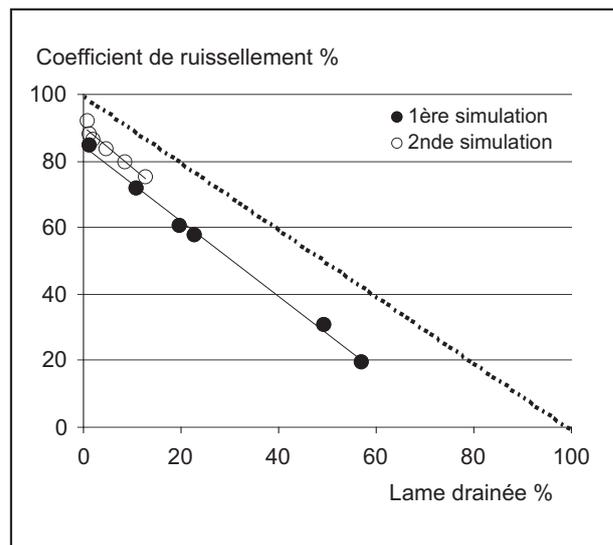
### Hierarchisation des différents sols et mécanismes en jeu

Les sols sont hiérarchisés, en terme de sensibilité au ruissellement, de la manière suivante: Fluviosol, sol salé-Na1, sol salé-Na2, Vertisol, sol salé-Na3, sol salé-Na4.

Le comportement des six sols diffère par l'importance relative des trois termes du bilan : ruissellement, drainage et stockage de l'eau dans le sol (figure 6). Le ruissellement augmente alors que le drainage diminue pour ces six sols. Cette diminution apparaît très progressive d'un sol à l'autre, sans opposer réellement un groupe de sol à un autre. Elle se fait sur une très large gamme pour la première simulation de pluie, sur une gamme beaucoup plus restreinte mais néanmoins visible pour la seconde simulation de pluie. Les sols les plus filtrants de la première simulation de pluie se situent, dans la seconde simulation de pluie, au niveau des sols les plus sensibles

**Figure 6** - Coefficient de ruissellement (%) en fonction du drainage (%) pour les six sols et les deux simulations de pluie.

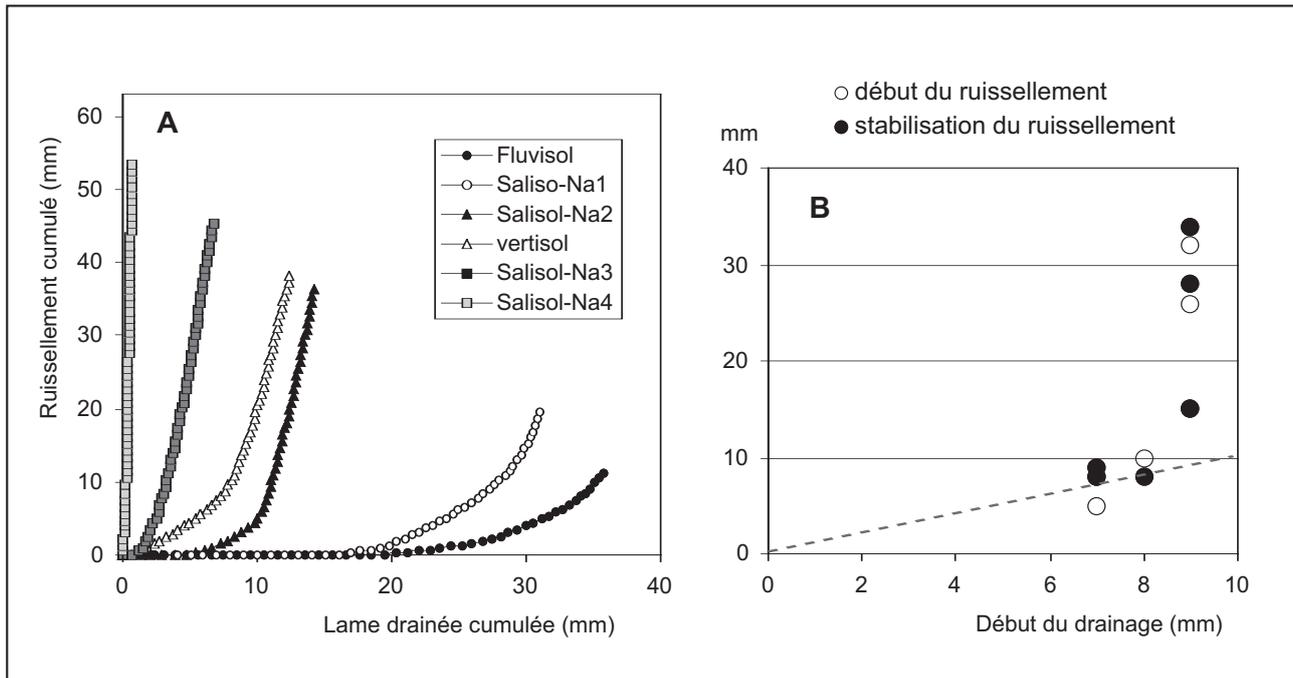
**Figure 6** - Runoff coefficient (%) versus drained water (%) for the six soils and the two rainfall simulations.



au ruissellement. La première simulation permet ainsi de bien distinguer la sensibilité des sols au ruissellement. Les conditions hydriques et structurales dans lesquelles ils se trouvent restent cependant déterminantes dans le ruissellement. Le stockage de l'eau dans le sol, écart à la première bissectrice sur la figure 6, varie peu d'un sol à l'autre. C'est le cas pour les deux simulations de pluie, ce stockage étant un peu plus important dans la première simulation

**Figure 7** - Lame ruisselée cumulée en fonction de la lame drainée cumulée : (A) début du ruissellement (mm), durée du régime transitoire de ruissellement (mm), en fonction du début du drainage (mm); (B) pour les six sols et la première simulation de pluie.

**Figure 7** - Cumulated runoff versus cumulated drained water: (A) runoff beginning (mm), runoff transient duration (mm) versus drainage beginning (mm); (B) for the six soils and the first rainfall simulation.



de pluie que dans la seconde. Ces différences d'un sol à l'autre indiquent qu'une quantité d'eau plus faible, sans doute liée à une réhumectation partielle du sol, est nécessaire pour avoir du ruissellement sur les sols à forte sodicité.

Le comportement des six sols diffère également par la dynamique des écoulements, tant celle du drainage que celle du ruissellement. La *figure 7* analyse ces dynamiques sur la première simulation de pluie et se focalise sur trois paramètres (Darboux *et al.* 2001) : la quantité d'eau nécessaire pour avoir un drainage, du ruissellement, pour que le ruissellement passe à un régime permanent. On distingue de ce point de vue deux groupes de sol. Le sol salé-Na1 et le Fluvisol supposent une quantité plus importante d'eau pour que le drainage s'instaure et que le ruissellement se déclenche. Le ruissellement n'intervient ainsi que lorsque le sol est fortement humecté. Pour ces deux sols, le déclenchement du ruissellement ne semble pas lié à la désagrégation de la surface due à l'impact premier des gouttes de pluie, mais aux conditions hydriques, et corrélativement, à une modification des états de surface du sol. Ceci est conforme aux processus décrits dans la littérature : la dégradation de la structure est très dépendante des conditions hydriques du sol.

Le comportement des quatre autres sols diffère des deux premiers par le fait qu'ils présentent une plus faible pluie d'imbibition. Ils sont donc très sensibles au ruissellement même pour des pluies de cumul modéré. Ils diffèrent également des sols du premier groupe par le fait que le drainage est faible, en tout cas bien inférieur à

l'apport des pluies, ce qui entraîne un début très rapide du ruissellement, plus précoce que le début du drainage pour le sol salé-Na4. Ce ruissellement précoce est probablement le fait d'une dispersion rapide des agrégats, en surface et dans les premiers centimètres du sol, avant même la réhumectation totale du massif de sol. Il conduit au début à de fortes concentrations en particules solides.

Les six types de sol présentent ainsi une sensibilité au ruissellement très différente. Le Fluvisol présente une capacité importante d'infiltration malgré une teneur en argile élevée. Ce type de sol, situé le plus souvent sur pente, permet un bon drainage des eaux. Il est le moins touché par la salinisation. Le sol salé-Na1 présente également une bonne capacité d'infiltration. Certains sols salés peuvent facilement faire l'objet d'une mise en valeur. Ceci est d'autant plus important que ce type de sol occupe une surface importante du Bas Chélif. A l'opposé, les sols salé-Na2 et les Vertisols dont les surfaces sont non négligeables dans la plaine, présentent une stabilité structurale modérée et une sensibilité au ruissellement prononcée. Ces sols peuvent faire l'objet d'une valorisation agricole moyennant une gestion rigoureuse de l'eau. Enfin, les sols salé-Na3 et salé-Na4, généralement abandonnés pour toute valorisation agricole, possèdent des caractéristiques physico-chimiques et hydrodynamiques très défavorables. Ils devraient faire l'objet d'une cartographie pour les délimiter, afin de les protéger ou d'envisager des aménagements spécifiques.

## CONCLUSION

Les protocoles mis en place devraient être complétés par un suivi de la qualité des eaux, puis par une approche in situ. Ces premiers résultats permettent néanmoins de situer le contexte du Bas Chélif dans le contexte des sols salés. Ils ont permis de mettre en évidence des indicateurs utilisables pour identifier la sensibilité des sols au ruissellement. Ces indicateurs sont la teneur en sodium échangeable et, dans une mesure qui reste encore à préciser, la teneur en matière organique. La CEe est, dans le contexte du Bas Chélif, paradoxalement et sur une certaine gamme, un indicateur de sensibilité au ruissellement qui peut être utile en première approche. Le rôle de la matière organique, qui n'a été étudié ici que sur une faible gamme, ou du magnésium qui n'a pas fait l'objet d'aucune investigation dans ce travail, mériteraient d'être approfondis. Les tests de stabilité structurale permettent de discriminer les sols et de prédire leur sensibilité au ruissellement et à l'érosion dans des situations aussi différentes que celles testées ici sous pluie simulée. Ceci est particulièrement notable, la gamme des sols étudiés ici étant relativement restreinte.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient C. Cheverry pour ses conseils dans la rédaction de ce texte, de même que les relecteurs, notamment M. Hachicha, pour leurs commentaires.

## BIBLIOGRAPHIE

AFES, 1995 - Référentiel pédologique - INRA, Paris, 332 p.

Agassi M., Shainberg I., Morin J., 1981 - Effect of electrolyte and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 : pp. 848-851.

Asseline J. et Valentin C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XV, n°4, pp. 321-349.

Ayers R.S., Westcot D.W., 1988 - La qualité de l'eau en agriculture. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*. 29 Rév. 1, 165 p.

Barzegar A., Nelson P.N., Oades J.M., et Rengasamy P., 1997 - Organic matter, sodicity, and clay type: influence on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 : pp. 1131-1137.

Benhur M., Sheinberg I., Bakker D. et Keren R., 1985 - Effect of soil texture and CaCO<sub>3</sub> content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity. *Irrig. Sci.* 6, pp. 281-294.

Boiffin, J., 1984 - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur ingénieur INA-PG, 320 p.

Boulaine J., 1957 - Etude des sols des plaines du Chélif. Thèse d'état de l'Université d'Alger. 582 p.

Bresson L. M., Cadot L., 1992 - Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 : pp. 1565-1570.

Casenave A. et Valentin C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM, Paris, 229 p.

CPCS, 1967 - Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Classification des sols. Institut national de la recherche agronomique (INRA). Paris: Laboratoire de Géologie-Pédologie de l'ENSA, 87 p.

Crescimanno G., Iovino M. et Provenzano G., 1995 - Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59 : pp. 1701-1708.

Daoud Y., Robert M., 1992 - Influence of particle size and clay organisation on hydraulic conductivity and moisture retention of clays from saline soils. *Applied Clay Science*, 6, pp. 293-299.

Daoud Y., 1993 - Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols des sols argileux. Thèse Doct d'état, INA Alger, 233 p.

Daoud Y., Cheverry C., Robert M., 1993 - Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols salés des plaines du Chélif (Algérie). *Science du Sol*, Vol. 31, 4, pp. 281-293.

Daoud Y., 1999 - Influence des conditions salines sur les propriétés physiques des sols des plaines du Chélif. Séminaire National sur la salinisation des terres agricoles en Algérie, Université de Chlef, Proceeding, pp. 5-15.

Darboux, F., Davy, P., Gascuel-Oudoux, C., Huang, C., 2001. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. *Catena*, 46, pp. 125-139.

Douaoui A., Walter Ch., Gaouar A. et Hammoudi S., 2001 - Assessment of the topsoil structural degradation of the Lower Chélif Valley (Algeria) - Application of multivariate Analysis. 4th conference of the Working Group on Pedometrics (WG-PM), Ghent, pp. 19-21 september.

Douaoui A., Walter Ch., 2002 - Dégradation de la qualité des sols de la plaine du Bas Chélif, Salinité-Sodicité-Stabilité Structurale. Forum sur la qualité des sols, Ministère de l'Environnement, Paris, 15 et 16 mai.

Durand J.H., 1958 - Les sols de la station d'étude des sols salins de Hamadana. Quelques aspects de la station d'étude des sols salins de Hamadana et de ses activités. *Revue «Terres et eaux»* n°28. pp. 2-17.

Farres P.J., 1987 - The dynamic of rain splash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14, pp. 119-130.

Fies J.C., Panini T., 1995 - Infiltrabilité et caractéristiques physiques de croûtes formées sur massif d'agrégats initialement secs ou humides soumis à des pluies simulées. *Agronomie*, 15, pp. 205-220

Goldberg S., Suarez D. L., Glaubig R. A., 1988 - Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid-zone soils. *Soil Science* 146, pp. 317-325.

Hachicha M., 1998 - Mise en valeur des sols salés - Organisation, fonctionnement et évolution des sols du nord de la Tunisie. Thèse de Doct de l'ENSAR, France, 229 p.

Halitim A., 1988 - Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p.

Kazman Z., Sainberg I., Gal M., 1983 - Effect of low levels of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soil. *Soil Science* 135, pp. 184-192.

Le Bissonnais Y., Bruand A. et Jarnagne M., 1989 - Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregates breakdown and crust structure. *Catena*, 16, pp. 377-392.

Le Bissonnais Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Euro. J. of Soil Sci.*, 47, pp. 425-437.

Mbagwu J.S.C., Auerwald K., 1999 - Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. *Soil & Tillage Research*, 50, pp. 197-206.

Mc Donald, Bureau National d'Etude pour le Développement Rural (BNEDEP), 1990 - Etude de l'avant projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhath Benziane et du réaménagement du Bas Chélif.

Oster J. D., Schroer F. W., 1979 - Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, pp. 44-47.

Oster J. D., Shainberg I., 2001 - Soil responses to sodicity and salinity: Challenges and opportunities. *Aust. J. Soil Res.*, 39, pp. 1219-1224.

Rengasamy P., Olsson K.A., 1991 - Sodicité et structure des sols. *Aust. J. Soil Res.*, 29, pp. 935-952.

- Römkens M. J. M., Helming K., Prasad S. N., 2001- Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena* 46, pp. 103-123.
- Saidi D., 1992 - Etude expérimentale de la stabilité structurale des sols des plaines du Chéouiff. Thèse Magister, INA, Alger, 140 p.
- Saidi D., Douaoui A., Le Bissonnais Y., Walter C., 1999 - Sensibilité des couches de surface des plaines du Chéouiff (Algérie) à la dégradation structurale. *Etude et Gestion des Sols*, 6 (1) : pp. 15-25
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y., Halitim A., 2004. Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Etude et Gestion des Sols*, pp. 137-148.
- Sumner M. E., 1993 - Sodic soils : New Perspectives. *Aust. J. Soils Res.*, 31, pp. 683-750.
- Tisdall J. M., Oades J. M., 1982 - Organic matter and water - stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33, pp. 141-163.
- United State Salinity Laboratory Staff, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Department of Agriculture, Handbook n°60, Washington DC.
- Valzano F. P., Greene R. S. B. Murphy A. B. W., Rengasamy P., Jarwal S. D., 2001 - Effects of gypsum and stubble retention on the chemical and physical properties of a sodic grey Vertosol in western Victoria. *Aust. J. Soil Res.*, 39, pp. 1333-1347.
- Vance W.H., McKenzie B. M., Tisdall J. M., 2002 - The stability of soils used for cropping in northern Victoria and southern New South Wales. *Aus. J. Soil Res.*, 40, pp. 615-624
- Walter Ch., Mc Bratney A. B., Douaoui A., Minasny, B., 2001- Spatial prediction of topsoil salinity in the Chéouiff valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Aust. J. Soil Res.*, 39, pp. 259-272.