

# Evolution structurale de la surface d'un sol tunisien sous différents modes d'irrigation

M. Hachicha<sup>(1)</sup> et V. Hallaire<sup>(2)</sup>

(1) INRGREF, 17 rue Hédi Karray BP n° 10, 2080 Ariana, Tunisie

(2) INRA, 65 rue de Saint-Brieuc, F35042 Rennes Cedex, France

## RÉSUMÉ

La pérennité des périmètres irrigués en Tunisie est tributaire de la disponibilité et de la qualité des ressources en eau et en sol. Celles-ci, souvent rares et affectées par le sel, sont essentiellement exploitées à des fins de production agricole. Leur gestion constitue un défi important pour le développement de l'agriculture et la préservation de l'environnement. Les conséquences de l'irrigation sur la structure du sol sont étudiées sur un sol limono-argileux tunisien, dans un contexte salin. Trois modalités d'irrigation (submersion, aspersion et goutte à goutte) ont été comparées à la situation initiale et à un témoin non irrigué. La structure a été quantifiée par analyse d'image afin de décrire la morphologie des vides (taille et forme des pores) et de la phase solide (taille des agrégats). Les résultats montrent un accroissement de macroporosité sous irrigation, mais la taille et la forme des pores affectés par ces changements, ainsi que la taille des agrégats, varient d'un mode d'irrigation à l'autre. Les modifications les plus importantes sont obtenues avec l'irrigation au goutte à goutte, qui provoque une augmentation de la porosité d'assemblage et un émiettement des agrégats dans les 5 premiers centimètres. L'irrigation par aspersion crée une croûte sur le premier centimètre qui permet le développement d'une activité biologique importante entre 2 et 10 cm. Sous irrigation par submersion les modifications sont du même type mais moins prononcées. Le développement de cette macroporosité apparaît comme un élément favorable pour éviter la salinisation et la dégradation physique du sol.

## Mots clés

Efficience de l'eau, Irrigation, Typologie des pores, Taille des agrégats, Structure du sol, Tunisie.

## SUMMARY

### **STRUCTURAL EVOLUTION OF A TUNISIAN TOPSOIL UNDER VARIOUS METHODS OF IRRIGATION : Consequences on the water and salts transfer**

*The consequences of irrigation on the soil structure were studied in a saline context on a silty clayey soil in Tunisia. Three irrigation methods (flood, sprinkler and drip irrigation) were compared to the initial situation and to a control plot without irrigation. The soil structure was quan-*

tified using image analysis in order to describe the macropore morphology (size and shape) and the size of the aggregates. The results showed an increase in macroporosity under irrigation (Figure 1), but the pore classes (Figures 2 and 3) affected by these changes and the size of the aggregates (Figure 4) varied from one treatment to the other. The main changes were obtained with drip irrigation, where the packing voids represented 50 % in the first 5 cm and the aggregates were mainly small. Sprinkler irrigation created a crust in the first centimetre, but this crust appeared to increase the biological activity in the 2-10 cm layer where the tubular voids were very numerous and the aggregates remained of small and medium size. Flood irrigation led to few changes: we observed a small increase in tubular porosity and a small decrease in aggregate size. The increase in macroporosity may help to avoid the salinization of the soil (Figure 5) and its physical degradation.

**Key-words**

Water efficiency, Irrigation, Macropore typology, Aggregate size, Soil structure, Tunisia.

**RESUMEN****EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL DE LA SUPERFICIE DE UN SUELO TUNECINO BAJO DIFERENTES MODOS DE RIEGO**

La perennidad de los perímetros irrigados en Túnez es tributaria de la disponibilidad y de la calidad de los recursos en agua y en suelo. Estos, a menudo raros y afectados por la sal, son esencialmente explotados por la producción agrícola. Su gestión constituye un desafío importante para el desarrollo de la agricultura y la preservación del medio ambiente. Las consecuencias del riego sobre la estructura del suelo son estudiadas sobre un suelo limoso-arcilloso tunecino, en un contexto salino. Tres modalidades de riego (sumersión, aspersión y goteo) fueron comparadas a la situación inicial y a un testigo no irrigado. La estructura del suelo fue cuantificada por análisis de imagen para describir la morfología de los vacíos (tamaño y forma de los poros) y de la fase sólida (tamaño de los agregados). Los resultados muestran un crecimiento de la macroporosidad bajo riego, pero el tamaño y la forma de los poros afectados por estos cambios, así que el tamaño de los agregados, varían de un modo de riego al otro. Las modificaciones las más importantes son obtenidas con el goteo, que provoca un crecimiento de la porosidad de ensambladura y un desmenuzamiento de los agregados en los 5 primeros centímetros. El riego por aspersión crea una costra sobre el primer centímetro que permite el desarrollo de una actividad biológica importante entre 2 y 10 cm. Bajo riego por sumersión las modificaciones son de mismo tipo pero menos pronunciadas. El desarrollo de esta macroporosidad aparece como un elemento favorable para evitar la salinización y la degradación física del suelo.

**Palabras claves**

Eficiencia del agua, riego, tipología de poros, tamaño de poros, estructura del suelo, Túnez

L'accroissement des superficies irriguées dans les régions arides et semi-arides mobilise la presque totalité des ressources en eau (FAO, 1995 ; World Bank, 1996 ; IPTRID, 1999). Après une ruée mondiale vers l'aménagement des périmètres irrigués, l'intérêt est porté sur l'efficacité de l'utilisation de cette eau dont plus de 80 % sont affectés à l'agriculture dans plusieurs pays. L'économie d'eau en agriculture est plus souvent raisonnée à travers l'optimisation du réseau hydraulique et la limitation des pertes qu'en fonction des propriétés hydro-pédologiques et des besoins en eau des cultures à l'échelle de la parcelle agricole. Les techniques d'irrigation localisée équipent de plus en plus de terres. Les conséquences de ces techniques restent peu évaluées, surtout avec des eaux riches en sel. Il en est de même de la porosité que le sol acquiert sous différentes modalités d'irrigation et qui conditionne la circulation de l'eau et le transfert des sels.

Par ailleurs, les études menées sur l'irrigation avec des eaux salées mettent souvent en avant les risques de dégradation des sols par salinisation ou par sodisation. L'estimation des risques de dégradation physico-chimique des sols permet d'assurer une bonne gestion du couple eau-sol et la durabilité des périmètres irrigués.

Des observations associées à une expérimentation de simulation de pluie sur des sols proches de ceux étudiés dans cet article (Hachicha *et al.*, 1996) ont montré que, comparée à la submersion, l'irrigation par aspersion génère des croûtes (organisations pelliculaires de surface selon Valentin, 1985) réduisant l'infiltration de l'eau. Les croûtes possèdent des conductivités hydrauliques plusieurs fois inférieures à celles du sol sous-jacent (Riou, 1966) et agissent comme barrière hydraulique (Hillel, 1988). Toutefois, cette discontinuité de porosité peut également protéger le sol de l'évaporation (Bresler et Kemper, 1970).

Différents auteurs ont étudié l'effet de l'irrigation sur l'évolution de la porosité du sol par des observations fines de sol non perturbé. Entre autres, Valentin et Ruiz Figueroa (1987) ont procédé à la caractérisation micromorphologique de la porosité des organisations qui se développent sous irrigation par aspersion et simulation de pluie. De leur côté, Mathieu et Ruellan (1987) ont mis en évidence l'effet de plusieurs années d'irrigation gravitaire sur le développement de nouveaux systèmes poreux.

Dans cet article, nous caractérisons l'effet de trois types d'irrigation (submersion, aspersion et goutte à goutte) avec une eau chargée en carbonates et en sulfates sur la structure de surface d'un sol tunisien (Hachicha, 1998). Cette caractérisation a nécessité des observations d'échantillons naturels en microscopie électronique, et une quantification des structures par analyse d'image. Les résultats montrent que l'irrigation augmente la macroporosité dans des proportions différentes selon les modalités, mais la morphologie des pores générés varie d'une situation à l'autre, et est en rapport avec la taille des agrégats de l'horizon de surface. Auparavant, une première caractérisation de la macroporosité par analyse d'image a mis en évidence la préservation d'un milieu très poreux sous une croûte de battance (Hallaire *et al.*, 1998).

## MATERIELS ET METHODES

### Site et dispositif expérimental

L'expérimentation a été réalisée sur quatre parcelles de la station expérimentale de Cherfech. Cette station est située à 25 km au Nord de Tunis (Tunisie), dans la Basse Vallée de la Mejerda. Le climat de la région est de type méditerranéen. La pluviométrie, de l'ordre de 470 mm, est très variable et l'évapotranspiration annuelle moyenne (Penman) est d'environ 1370 mm.

Les sols développés sur des dépôts alluvionnaires sont représentatifs de la Basse Vallée de la Mejerda. Il s'agit de sols peu évolués d'apport fluvial (Xérofluvent) qui se caractérisent par une grande hétérogénéité (CRUESI, 1970). Ces sols présentent un premier horizon (0-40 cm) riche en éléments fins (70-85 % argile + limon fin), un second horizon (40-90 cm) argilo-limoneux à limono-argileux et un horizon limono-sableux (100-130 cm). Ils contiennent environ 46 % de calcaire total, 17 % de calcaire actif et des traces de gypse. Ces sols sont formés d'argiles interstratifiées illite – smectite à dominance de montmorillonite (Gallali, 1980). Au début des années soixante, ces sols d'apport alluvial, salins et hydromorphes avaient une nappe fluctuant entre 0,5 m en hiver et 2 m en été. La mise en place d'un réseau de drainage était par conséquent nécessaire. Ce réseau est formé de drains enterrés en poterie à une cote moyenne de 1,5 m.

Les quatre parcelles étudiées étaient occupées par une culture de tomates repiquées en motte en avril après une préparation superficielle du sol (Askri et Rejeb, 2000). Trois parcelles ont permis d'expérimenter trois modes d'irrigation sur l'ensemble du cycle végétatif de la tomate : irrigation par submersion ou gravitaire, irrigation par goutte à goutte ou localisée, et irrigation par aspersion (*tableau 1*). La quatrième parcelle est le témoin non irrigué.

L'eau d'irrigation de qualité moyenne provient de l'oued Mejerda. Après plus d'une trentaine d'années, l'irrigation avec cette eau n'a pas entraîné de salinisation grave du sol. Pendant la période d'étude, elle présentait un résidu sec compris entre 1,47 et 1,26 g l<sup>-1</sup> de sels par litre et une conductivité électrique variant entre 2,08 et 2,40 dS m<sup>-1</sup> pour des SAR compris entre 4,6 et 6,4. Le pH était de 7,5 et le faciès géochimique était chloruré sodique. Le rapport Cl/SO<sub>4</sub> était de 1,2 à 1,6 : les eaux de la Mejerda sont saturées en carbonates et proches de la saturation en sulfates (Bahri, 1993). L'alcalinité résiduelle calcite est négative de l'ordre de -7 à -9 meq.l<sup>-1</sup> alors qu'elle est positive pour la calcite+gypse de l'ordre de +7 à +9 meq.l<sup>-1</sup>. Les sols irrigués avec cette eau évoluent à pH neutre comme dans la voie saline neutre tant que la précipitation du gypse est limitée.

Au cours du cycle d'irrigation (avril - octobre), le volume global d'eau apporté variait, selon la modalité, de 6 800 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> à 8 600 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, soit un apport en sels (pour un résidu sec moyen de 1,37 g l<sup>-1</sup>) compris entre 9,4 et 11,7 t ha<sup>-1</sup> (*tableau 1*). Au cours de ce cycle, on a enregistré 117 mm de pluie.

**Tableau 1** - Modalités d'irrigation, apports d'eau et caractéristiques des parcelles**Table 1** - Characteristics of the three irrigated plots (flood, drip and sprinkler) and the irrigation water

Modalité d'irrigation	Caractéristiques des parcelles irriguées		Apports	
			Eau en m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Sels en T ha <sup>-1</sup> (RS=1,37 g l <sup>-1</sup> )
<b>Submersion</b>	952 m <sup>2</sup> (34 m x 28 m)	34 billons 70 plantes par ligne Lignes espacées de 1 m	8 600	11,7
<b>Goutte à goutte</b>	2040 m <sup>2</sup> (34 m x 60 m)	34 lignes de goutteurs 150 plantes par ligne Lignes espacées de 1 m	6 800	9,4
<b>Aspersion</b>	2040 m <sup>2</sup> (2 parcelles)	34 lignes de plantes 150 plantes par ligne Lignes espacées de 1 m 16 asperseurs par parcelle	6 800	9,4

## Echantillonnage

Des échantillons cylindriques de sol à structure conservée (diamètre 20 cm, hauteur 20 cm) ont été prélevés sur les 20 premiers centimètres sur billon dans les 5 situations suivantes : avant irrigation (avril) ; après un cycle d'irrigation (octobre) dans chacune des 3 parcelles irriguées (submersion, aspersion, goutte à goutte) ; dans la parcelle témoin non irriguée. Au laboratoire, les échantillons ont été imprégnés dans une résine contenant un pigment fluorescent (Murphy *et al.*, 1977). Après induration, les échantillons ont été découpés de façon à présenter une section verticale pour l'analyse d'image et une lame mince pour l'observation en microscopie électronique.

## Acquisition et segmentation des images

Les images sur les sections verticales ont été acquises sous éclairage ultraviolet (365 nm) et numérisées en 768 x 576 pixels avec une résolution spectrale de 256 niveaux de gris et une résolution spatiale de 10 µm par pixel ; chaque image couvre ainsi un champ de 7,7 mm x 5,8 mm. Les profondeurs analysées ont été choisies en fonction des traits morphologiques reconnus lors de la description des profils : à 1 cm, 5 cm et 15 cm dans toutes les situations, et dans des situations intermédiaires pour caractériser les 5 premiers centimètres sous irrigation par aspersion, où une croûte de surface a pu être décrite. Chaque profondeur analysée a donné lieu à 5 répétitions.

Les images en niveaux de gris ont ensuite été segmentées selon la procédure décrite par Hallaire (1994), de façon à obtenir pour chacune d'elles deux images binaires : l'une présentant la phase porale, l'autre présentant la phase solide.

## Quantification de la macroporosité

L'image binaire présentant la phase porale a été filtrée de façon à ne retenir que les pores d'au moins 3 pixels d'épaisseur, soit 30 µm. Cette macroporosité a été quantifiée selon 3 caractéristiques :  
- la macroporosité surfacique totale, correspondant au nombre de pixels appartenant aux pores ramené à la surface totale de l'image.  
- la morphologie des macropores, après leur individualisation en « poroïds » (Moran *et al.*, 1988) sur l'image binaire. Deux paramètres morphologiques ont été retenus : la taille des pores, exprimée par l'aire de leur section sur l'image (a), et leur forme, exprimée par l'indice d'allongement (Coster et Chermant, 1985). Cet indice e est défini par :

$$e = (\text{périmètre})^2 / 4\pi \cdot a$$

- une typologie des macropores (Hallaire et Cointepas, 1993) a été établie en définissant 3 classes de taille et 3 classes de forme. La forme des pores est indicatrice de leur origine, elle permet de distinguer la porosité biologique, fissurale, et d'assemblage. Le *tableau 2* présente les neuf classes morphologiques résultant du croisement de ces deux paramètres.

**Tableau 2** - Classification morphologique des macropores en fonction de leur taille (exprimée par leur aire  $a$ ) et de leur forme (exprimée par leur indice d'allongement  $e$ )

**Table 2** - Morphological classes of macropores according to their size (estimated by the area  $a$ ) and shape (estimated by the elongation index  $e$ )

		Forme du macropore		
		Pore tubulaire $e < 2,5$	Fissure $2,5 < e < 10$	Pore d'assemblage $e > 10$
Taille du macropore	Petit $a < 0,02 \text{ mm}^2$	T1	F1	A1
	Moyen $0,02 \text{ mm}^2 < a < 0,5 \text{ mm}^2$	T2	F2	A2
	Gros $a > 0,5 \text{ mm}^2$	T3	F3	A3

### Taille des agrégats

Une granulométrie des agrégats a été effectuée sur les images binaires présentant la phase solide. La méthode utilisée consiste en une itération de « fermetures morphologiques » (Serra, 1982) permettant de mesurer la taille des plus gros éléments structurants inscriptibles dans l'image binaire. Le spectre de taille résultant de cette opération a permis de classer les agrégats en 4 catégories en fonction de leur diamètre équivalent ( $< 1 \text{ mm}$ ,  $1-2 \text{ mm}$ ,  $2-3 \text{ mm}$ ,  $> 3 \text{ mm}$ ).

### Observations en microscopie électronique

Des observations en microscopie électronique à balayage (MEB) et à transmission (MET) ont été réalisées sur 10 échantillons de la croûte en surface du sol de la parcelle irriguée par goutte à goutte, échantillons qui présentaient des dépôts. La microscopie à balayage avait pour objet de décrire la morphologie de ces dépôts, la microscopie à transmission de déterminer leur composition.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Effet de l'irrigation sur la morphologie du sol

A la fin des irrigations, des observations macroscopiques de la surface du sol ont été effectuées. L'irrigation par submersion a entraîné une fissuration du sol en surface et l'apparition de polygones légèrement bombés au milieu, de taille variable, aux alentours de  $7 \text{ cm}$  sur  $5 \text{ cm}$ . Une légère croûte en surface surmontait un matériau polyédrique sub-anguleux. Les fissures étaient profondes de quelques centimètres. A chaque irrigation, elles étaient des lieux préférentiels d'écoulement de l'eau. Quant à l'irrigation goutte à gout-

te, elle a engendré la formation de croûtes blanchâtres près de la ligne des goutteurs. Ces croûtes ont été soumises à l'analyse en microscopie électronique. Le sol présentait une structure grumeleuse. Entre les lignes de goutteurs, le sol était tassé par piétinement. Enfin, l'aspersion a induit la formation d'une croûte de battance assez continue au-dessous de laquelle, le sol était poreux, de structure grenue.

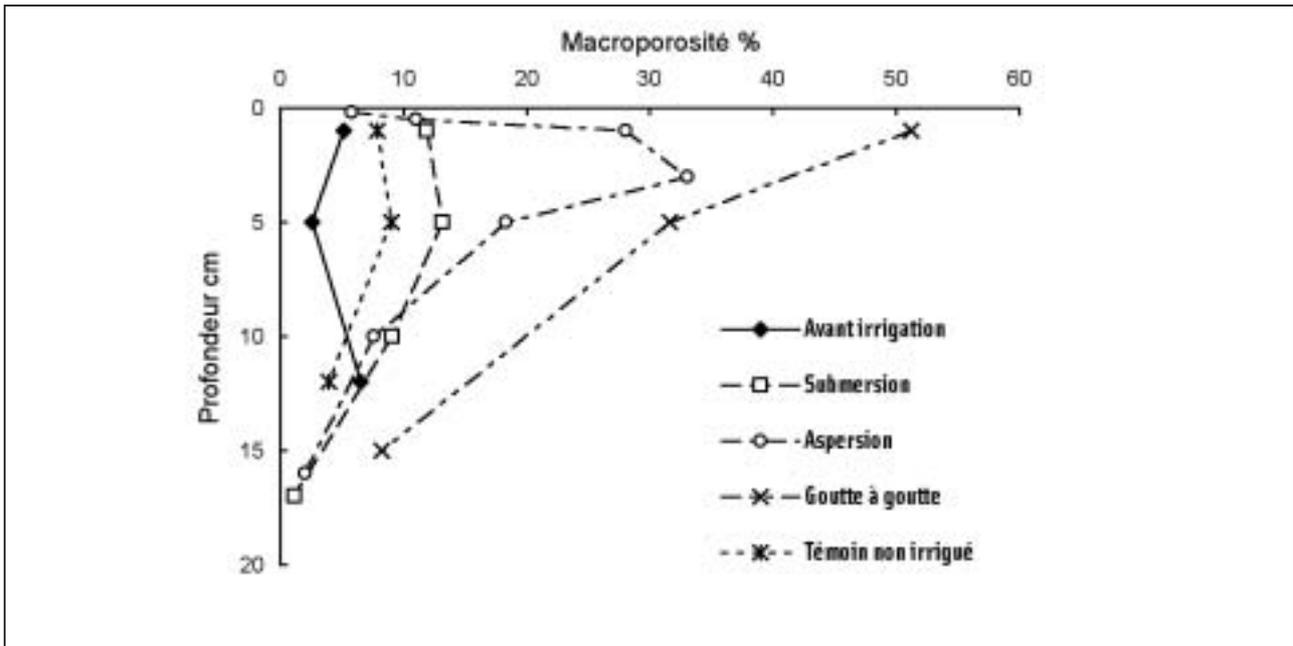
Sous la couche travaillée et quel que soit le mode d'irrigation, le sol présentait une structure polyédrique nette avec des fissures.

### Profils de macroporosité

La figure 1 présente les profils de macroporosité sur les 15 premiers centimètres pour les 5 modalités. A partir de la profondeur de  $10 \text{ cm}$ , les valeurs sont faibles dans toutes les situations ( $6$  à  $8 \%$  vers  $10 \text{ cm}$ , moins de  $5 \%$  à  $15 \text{ cm}$ ) et les différences peu significatives : l'effet de l'irrigation est donc localisé sur les 10 premiers centimètres et le niveau sous-jacent reste peu poreux au cours du temps.

Sur cet horizon superficiel, on observe dans tous les cas un accroissement de porosité au cours de la saison de végétation :

- pour le témoin non irrigué la macroporosité est en moyenne doublée ( $8$  à  $9 \%$ ) aux profondeurs  $1$  et  $5 \text{ cm}$  ;
- l'irrigation, quel que soit son mode, accentue encore cet accroissement de macroporosité. Pour la submersion le profil est homogène dans cet horizon de surface ( $12$  à  $13 \%$ ) ; l'aspersion provoque dans les 5 premiers millimètres une réduction de porosité ( $6 \%$  à la profondeur  $2 \text{ mm}$ ), mais sous cette couche la macroporosité est très élevée ( $20$  à  $30 \%$  entre  $1$  et  $5 \text{ cm}$ ) ; enfin le goutte à goutte provoque un accroissement considérable dès la surface du sol (plus de  $50 \%$ ), s'atténuant progressivement avec la profondeur.

**Figure 1** - Profils de macroporosité de l'horizon superficiel selon le mode d'irrigation en fin de cycle cultural**Figure 1** - Macroporosity profiles of the topsoil according to the irrigation method at the end of crop cycle

## Morphologie des macropores et taille des agrégats

Les histogrammes de la *figure 2* présentent la répartition des macropores selon leur typologie ; la *figure 3* propose quelques images illustrant leur morphologie à deux niveaux (en surface, et à 5 cm de profondeur). Afin de décrire plus finement les modifications structurales liées au type d'irrigation, la morphologie des pores sera analysée en parallèle avec la distribution de taille des agrégats (*figure 4*).

Au début du cycle de végétation, la macroporosité est surtout composée de tubules et de fissures, les pores d'assemblage n'étant qu'en faible quantité dans l'horizon de surface. On constate également que les agrégats sont de taille très variable sur les premiers centimètres du sol, pour devenir majoritairement de petite taille à 15 cm de profondeur. La préparation du sol pour la plantation des tomates n'a donc pas permis d'obtenir une structure meuble : des agrégats de grande taille subsistent, laissant entre eux peu de vides. Le niveau sous-jacent correspond à une structure polyédrique fine, constituée d'un assemblage serré de polyèdres, en contact les uns avec les autres ou séparés par quelques fissures fines.

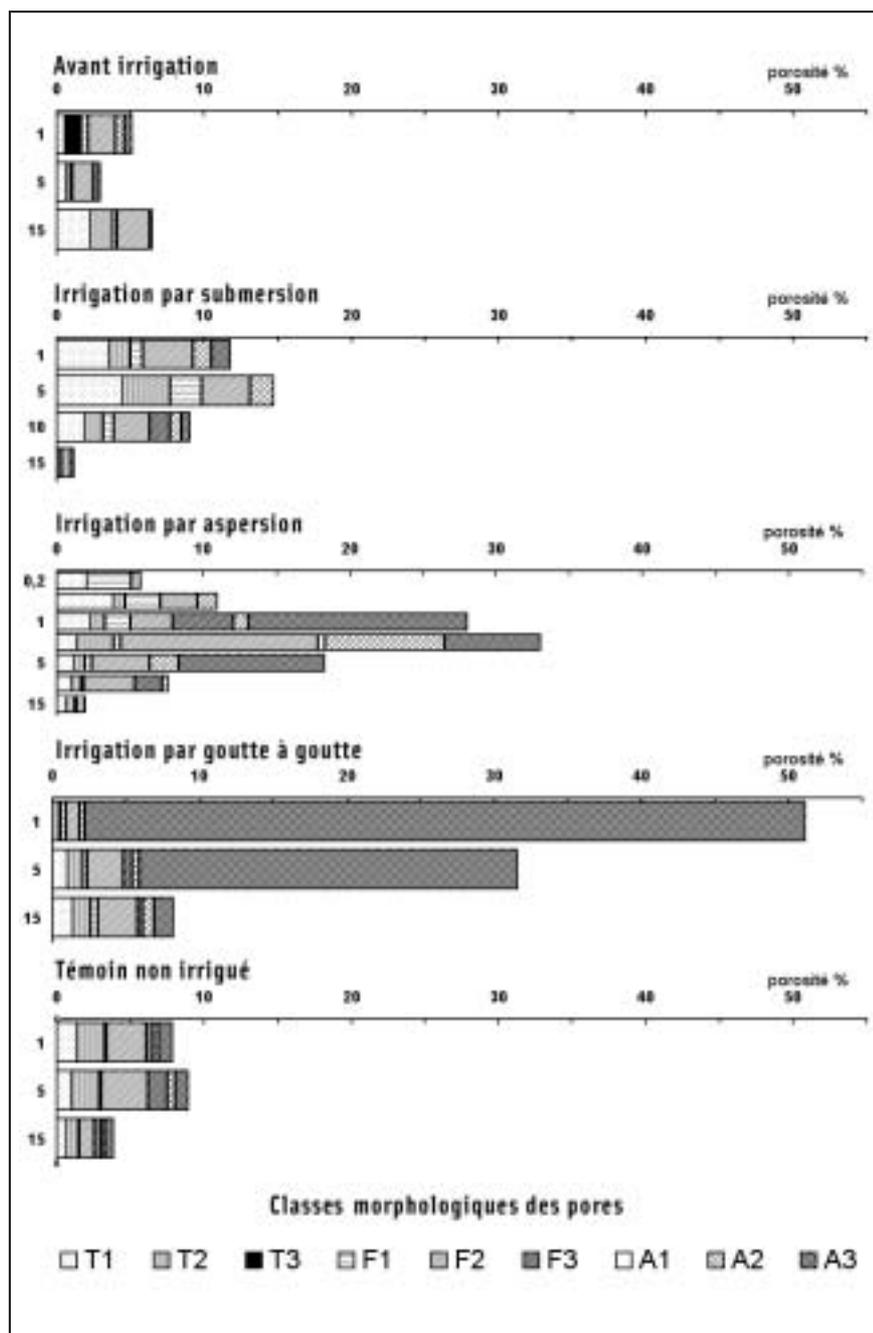
En fin de saison de végétation, le témoin non irrigué montre qu'il y a eu une évolution quantitative, mais non qualitative de la porosité : les classes morphologiques sont globalement représentées dans les mêmes proportions que dans la situation initiale, mais leur pourcentage a doublé. Cette augmentation s'accompagne d'une légère diminution de la taille des agrégats en surface. La structure poly-

édrique est donc maintenue, mais les polyèdres sont plus petits, du fait du retrait au cours de l'été des matériaux argileux gonflants constitués de montmorillonite. Le niveau inférieur (15 cm) présente une évolution plutôt inverse, avec une diminution de porosité et un accroissement de taille des agrégats ; cette tendance au compactage reste toutefois peu importante.

Dans le sol irrigué par submersion, l'accroissement de macroporosité est essentiellement dû à l'augmentation des pores tubulaires, y compris les plus petits, et des fissures, alors que les pores d'assemblage évoluent peu. Ces modifications structurales peuvent être liées à deux phénomènes : d'une part une plus forte activité biologique au sein de l'horizon de surface, provoquant un important réseau de galeries ; d'autre part, une succession d'épisodes de gonflements et de retraits liée au mode d'apport des doses d'irrigation, provoquant une alternance de périodes de saturation et de dessiccation du sol en surface. La prolifération des fissures et des galeries ne modifie cependant pas la structure du sol qui reste polyédrique, mais le dessèchement amène à une fragmentation des polyèdres qui deviennent de plus en plus fins (majoritairement inférieurs à 1 mm sur les 10 premiers centimètres).

L'irrigation par aspersion provoque une croûte de surface, ce qui a nécessité d'analyser plus finement cette modalité (aux profondeurs de 0,2 - 0,5 - 1 - 3 - 5 - 10 et 15 cm). Cette croûte, d'épaisseur 2 à 3 mm, est formée d'agrégats de très petite taille, résultant de la destruction des polyèdres sous l'impact des gouttes d'eau projetées. Les macropores y sont peu nombreux, principalement constitués de fissures fines dans un matériau soudé. Immédiatement sous cette croû-

**Figure 2 - Classification morphologique des macropores selon le mode d'irrigation**  
**Figure 2 - Morphological classification of the macropores according to the irrigation method**



te, on observe un matériau très meuble, constitué d'agrégats restant majoritairement de très petite taille (moins de 1 mm pour 90 % d'entre eux), et présentant une macroporosité très élevée où toutes les classes morphologiques sont représentées. Les nombreuses galeries témoignent d'une activité biologique importante, l'abondance des fissures et des pores d'assemblage sont caractéristiques d'une structure grenue très développée et très poreuse. La croûte de surface semble ainsi avoir préservé le niveau sous jacent (1-10 cm) et favorisé l'activité biologique.

L'irrigation par goutte à goutte se traduit par un dépôt de surface et par une augmentation considérable de la porosité d'assemblage, pouvant atteindre 50 % à la surface du sol. Les agrégats sont sensiblement plus gros que dans les deux autres modes d'irrigation, mais sont toutefois plus petits qu'avant irrigation ou qu'en situation non irriguée. Cet assemblage très lâche d'agrégats de taille moyenne est caractéristique d'une structure grumeleuse, dont le développement s'atténue graduellement avec la profondeur. L'apport en continu et à faible dose de l'eau d'irrigation permet de maintenir une saturation du sol en surface, ce qui semble défavoriser le développement de l'activité biologique (pores tubulaires absents en surface) et s'opposer au retrait (fissures peu nombreuses).

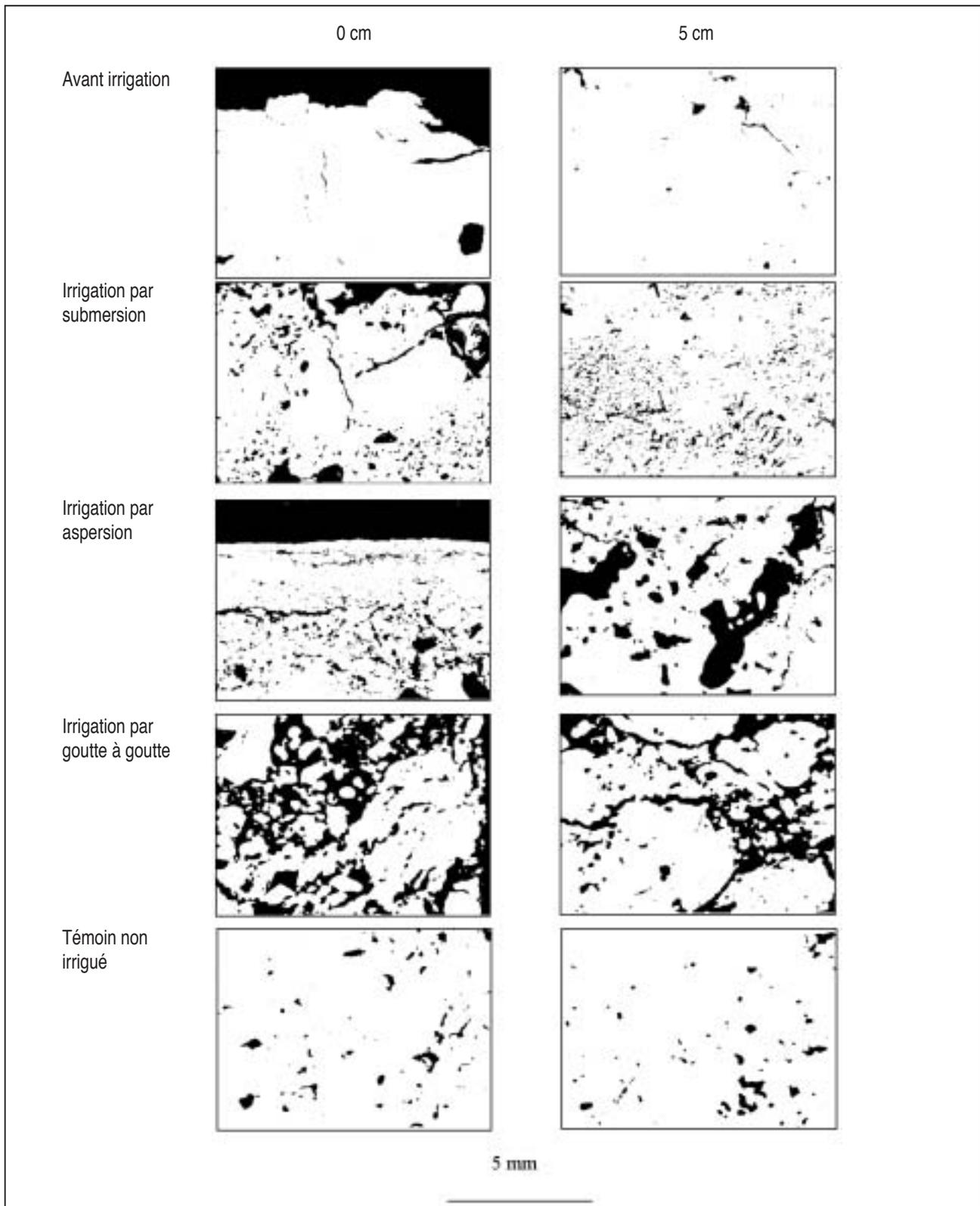
Ainsi, les différentes modalités d'irrigation mettent en jeu des contraintes différentes qui s'exercent sur la surface du sol :

- Submersion : force gravitaire (poids de l'eau) ; ce qui est mis en jeu dans l'évolution du sol, c'est la stabilité structurale.
- Aspersion : énergie cinétique « impact des gouttes d'eau projetée » ; ce qui est mis en jeu dans l'évolution du sol, c'est la stabilité structurale et le transport.
- Goutte à goutte : forces capillaires ; ce qui est mis en jeu c'est la structure « capillaire » et la continuité du sol et la demande climatique (ETM).

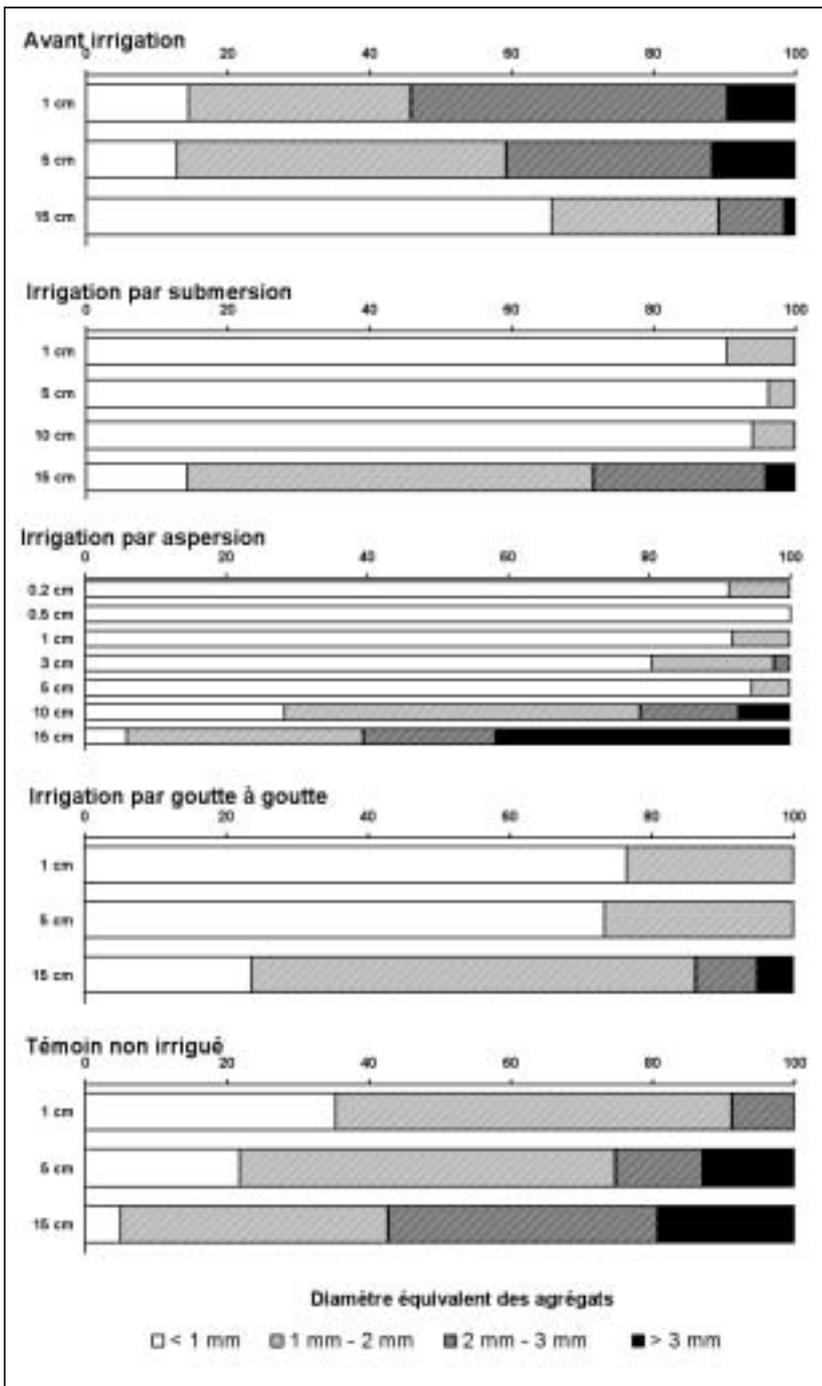
### Analyse en microscopie électronique du dépôt de surface dans le traitement goutte à goutte

Les observations *in situ* ont montré que l'irrigation par goutte à goutte engendrait la formation de dépôts blanchâtres près de la ligne des goutteurs. L'analyse en microscopie électronique d'échantillons de ces dépôts a permis d'identifier leur constitution.

**Figure 3** - Images illustrant la structure du sol en surface et à 5 cm de profondeur (macropores en noir, phase solide en blanc)  
**Figure 3** - Images showing the soil structure at the surface and at 5 cm depth (macropores in black, solid phase in white)



**Figure 4 -** Distribution en taille des agrégats  
**Figure 4 -** Size distribution of the aggregates



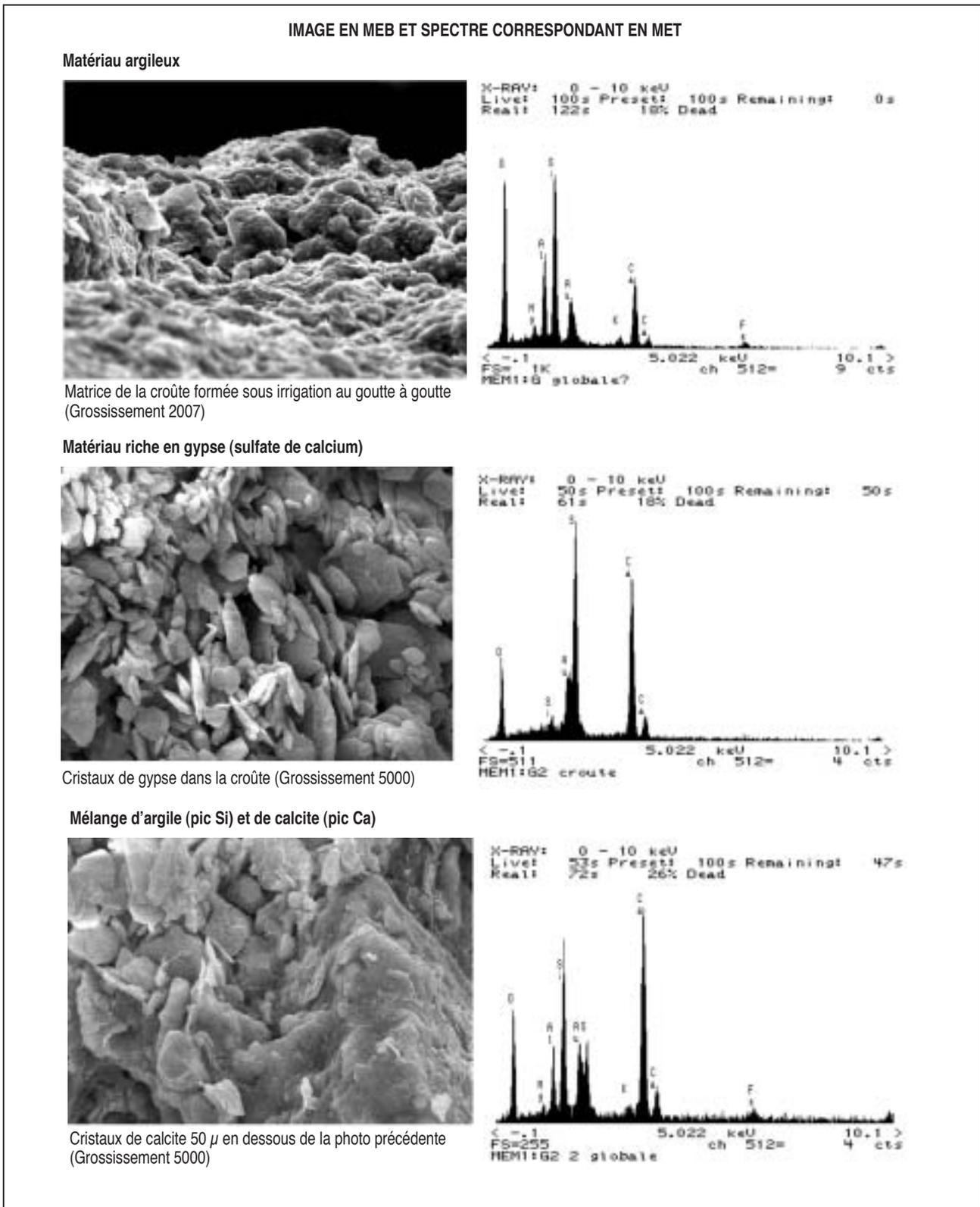
La figure 5 présente les images (MEB) et les spectres (MET) depuis la surface du dépôt jusqu'à la matrice argileuse, sur une distance de  $100 \mu\text{m}$ . On met ainsi en évidence la présence de lentilles gypseuses en surface auxquelles succède un mélange d'éléments gypseux et de calcite, qui superpose une matrice d'argiles smectitiques et de carbonates. Les accumulations de gypse et de calcite résultent de la concentration des eaux d'irrigation. Par

l'apport d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  qu'elles constituent, ces accumulations permettent de maintenir la stabilité structurale du sol. Bien qu'il soit ici limité, le processus de précipitation du gypse joue ainsi le rôle d'un amendement en continu et protège le sol de la sodisation. Ceci confirme les résultats déjà obtenus dans ce même site avec le même type de sol et la même qualité d'eau d'irrigation par Gallali (1980) dans son étude sur les transferts sels-matière organique, et Valles (1985) dans son étude et modélisation des transferts d'eau et de sels. Ainsi, les sols irrigués avec cette eau évoluent à pH neutre selon la voie saline neutre. Par ailleurs, l'alcalinité résiduelle calcite étant négative, l'activité du calcium au cours de l'évaporation croît et celle du carbonate diminue dès lors que la saturation vis-à-vis de la calcite est atteinte. Enfin, le phénomène de dégradation des sols de la Basse Vallée de la Mejerda par sodisation a été écarté par plusieurs auteurs et selon différentes approches (CRUESI, 1970).

## CONCLUSION

Pour compléter les études menées sur l'irrigation avec des eaux salées mettant en avant les risques de salinisation et/ou de sodisation des sols, nous avons analysé son effet sur la structure du sol, responsable de la dynamique de l'eau et du transfert des solutés. Nous avons comparé pour cela différents modes d'irrigation (submersion, aspersion, goutte à goutte), en référence à une situation initiale et à un témoin non irrigué, sur un sol limono-argileux du périmètre irrigué de Cherfech (Tunisie). La structure des 15 premiers centimètres du sol a été décrite par analyse d'image de façon à quantifier l'abondance et la morphologie des macropores, et la taille des agrégats. Compte tenu du caractère salé de l'eau d'irrigation, nous avons également analysé en microscopie électronique les dépôts de sels en surface.

La structure est profondément affectée par l'irrigation entre 0 et 10 cm. Dans tous les cas, l'irrigation provoque une augmentation de macroporosité et une réduction de la taille des agrégats, mais ces modifications varient selon le mode d'irrigation. La submersion permet le maintien de la structure polyédrique

**Figure 5 -** Analyse des croûtes en microscopie électronique à balayage et à transmission**Figure 5 -** Analysis of the crusts using SEM and TEM

originelle, tout en favorisant l'activité biologique qui crée un important réseau de galeries. L'aspersion provoque une croûte de surface compacte, sous laquelle se développe une structure grenue et favorisant là aussi l'activité biologique. Enfin le goutte à goutte favorise le développement dès la surface d'une structure grumeleuse très lâche et très poreuse.

En définitive, les modifications structurales sous irrigation permettent à ce sol de garder un important système macroporal pour le lessivage des sels, évitant leur salinisation en surface, et la présence d'une croûte superficielle, présentée souvent comme une contrainte hydrodynamique, devient un atout pour le développement de l'activité biologique.

## REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos vifs remerciements à la Fondation Internationale pour la Science pour son appui financier, à Jeannine Berrier pour son aide dans les observations microscopiques, et à Yannick Bénard pour la préparation des échantillons de sol.

## BIBLIOGRAPHIE

- Askri H., Rejeb S., 2000 - Effets de différentes techniques d'irrigation sur deux cultures maraîchères irriguées avec une eau saumâtre. Séminaire " Recherche en irrigation et drainage" Hammamet 14-16/11/2000, 142-158, Ed. Inrgref/Cemagref.
- Bahri A., 1993 - Impacts d'un épandage de boues résiduaires urbaines sur le fonctionnement hydraulique d'un réseau de drainage et sur la qualité des eaux de drainage. Science du sol, Vol. 30, 2, pp. 57-74.
- Bresler E., Kemper W.-D., 1970 - Soil water evaporation as affected by wetting methods and crust formation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34, 3-8.
- Coster M., Chermant J.L., 1985 - Précis d'analyse d'images. Editions du CNRS, Paris, 521 p.
- CRUESI, 1970. Recherche et formation en matière d'irrigation avec des sols salés, 1962-1969 - Rapport technique, Projet PNUD/UNESCO, 243 p.
- FAO, 1995 - La mise en valeur des eaux au profit de la sécurité alimentaire. FAO - Rome, 43 p.
- Gallali T., 1980 - Transfert sels - matière organique en zone arides méditerranéennes. Thèse Univ. Nancy I, 202 p.
- Hachicha M., 1998 - Mise en valeur des sols salés. Organisation, fonctionnement et évolution de sols salés du Nord de la Tunisie. Thèse ENSA Rennes, 229 p.
- Hachicha M., Pontanier R., Dridi B., 1996 - Comportement de sols argileux irrigués sous pluies simulées. Rôles des organisations superficielles pour le lessivage des sels et leur érodibilité dans le choix du mode d'irrigation. Direction des Sols/ORSTOM ES 288, Tunis, 22 p.
- Hallaire V., Cointepas J.P., 1993 - Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. Agronomie, 13, 155-164.
- Hallaire V., 1994 - Description of microcrack orientation in a clayey soil using image analysis. In: Proceedings of 9 th International Working Meeting on Soil Micromorphology (AJ Ringrose-Voase, GS Humphreys, eds). Elsevier, Amsterdam, 549-557.
- Hallaire V., Hachicha M., Cheverry C., 1998 - Evolution structurale d'un horizon de surface argileux sous irrigation (Kalaât Landelous, Tunisie). Caractérisation de la macroporosité par analyse d'images. Etude et Gestion des Sols, 5, 107-116.
- Hillel D., 1988 - L'eau et le sol : principes et processus physiques. Traduit de l'anglais par L.W. De Baker. 2ème éd. Revue. Louvain-La-Neuve : Academia, 288 p.
- IPTRID, 1999 - Poverty reduction and irrigated agriculture. IPTRID Issues Paper No.1, FAO - Rome, 18 p.
- Mathieu C., Ruellan A., 1987 - Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride : l'exemple de la Basse Moulouya (Maroc). Cahiers ORSTOM Pédologie, 13, 3-25.
- Moran C.J., Koppi A.J., Murphy B.W., McBratney A.B., 1988 - Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. Soil Use and Management, 4, 96-102.
- Murphy C.P., Bullock P., Turner R.H., 1977 - The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. Journal of Soil Science, 28, 498-508.
- Riou C., 1966 - Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. Cahiers ORSTOM Hydrologie, 5, 31-42.
- Serra J., 1982 - Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 610 p.
- 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., Ruiz Figueroa J.F., 1987 - Effects of cinetics energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In: Soil Micromorphology (N. Fedoroff, L.M. Bresson, M.A. Courty, eds). AFES. Plaisir, 401- 408.
- Valles V., 1985 - Etude et modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thèse de Doc. I.N.P. Toulouse, 146 p.
- World Bank, 1996 - Global Food Supply Prospects. A background paper. World Food Summit, Rome, November 1996. World bank Technical Paper 353, Washington.

