

Évolution structurale d'un horizon de surface argileux sous irrigation

(Kalaât Landelous, Tunisie)

Caractérisation de la macroporosité par analyse d'images

V. Hallaire⁽¹⁾, M. Hachicha⁽²⁾ et C. Cheverry⁽¹⁾

1 - INRA-ENSA, Unité de Science du Sol et de Bioclimatologie, 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 RENNES Cedex, France

2 - INRGREF, BP 10, 2080 ARIANA TUNIS, Tunisie

RÉSUMÉ

L'extension de l'irrigation en Tunisie est limitée par la quantité et la qualité des eaux, la présence d'une nappe phréatique peu profonde et salée, et la nature des sols : ces facteurs augmentent les risques de dégradation des sols dans les périmètres irrigués. L'objectif de ce travail est d'estimer les modifications structurales subies par un horizon de surface soumis à une irrigation par aspersion par des eaux salées. L'étude a été réalisée sur un sol argilo-limoneux du périmètre de Kalaât Landelous, au nord du pays. Elle a permis de caractériser la macroporosité sur les quinze premiers centimètres, par analyse d'images sur des échantillons de sols non remaniés, observés à trois échelles de résolution spatiale. La porosité a été quantifiée au moyen d'une approche morphologique, prenant en compte la taille et la forme des pores, ainsi que par leur spectre de porosité. En comparant un horizon travaillé soumis à l'irrigation et un horizon non travaillé sans irrigation, on montre que la macroporosité est plus importante après irrigation ; une analyse typologique montre que cette augmentation est due à la création d'une porosité très grossière, constituée de pores d'assemblage entre les agrégats, ceux-ci pouvant laisser entre eux des espaces de plus de 5 mm. En confrontant ces résultats aux descriptions pédologiques de terrain, on montre que l'irrigation a permis de passer d'une structure polyédrique subanguleuse, présentant une porosité essentiellement fissurale et tubulaire, à une structure grenue, présentant une importante porosité interstitielle entre les agrégats.

Mots clés

Macroporosité, irrigation, structure, analyse d'images.

SUMMARY

STRUCTURAL CHANGES OF A CLAYEY TOPSOIL UNDER IRRIGATION (KALAÂT LANDELOUS, TUNISIA) :
MACROPORE CHARACTERIZATION USING IMAGE ANALYSIS

The extent of irrigation in Tunisia is limited by the quantity and the quality of water, the presence of a saline watertable near the surface, and the soil composition : these factors increase the risks of soil degradation in the irrigated areas. The aim of this paper is to estimate the structural changes of a topsoil due to an irrigation with saline water. The study was carried out on a clayey soil in the Kalaât Landelous area. It allowed to characterize the macropore space of the first 15 centimeters, using image analysis on undisturbed soil samples, observed at three different scales. Pore space was quantified with a morphological approach, which took into account pore size and shape, and porosity spectrum (figure 1). We compared the topsoil in two situations : without irrigation and after irrigation. The macroporosity increased after irrigation (figure 2). A typological characterization showed that this increase was due to the creation of a very coarse pore space (figure 3), which consisted in packing voids between the aggregates ; the spaces between the latter could exceed 5 mm (figure 4). Combining these results with field descriptions led us to show that irrigation allowed the soil structure to change from a subangular blocky structure, with microcracks and channels, to a granular structure, with large packing voids between the aggregates (figure 5).

Key-words

Macropores ; irrigation ; structure ; image analysis

RESUMEN

EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL DE UN HORIZONTE DE SUPERFICIE ARCILLOSA BAJO IRRIGACIÓN (KALSÂT, LANDELOUS, TÚNEZ). Caracterización de la macroporosidad por análisis de imágenes.

La extensión de la irrigación en Túnez está limitada por la cantidad y la calidad de las aguas, la presencia de una capa freática poco profunda y salada, y la naturaleza de los suelos : estos factores aumentan los riesgos de degradación de los suelos en los perímetros irrigados. El objetivo de este trabajo es estimar las modificaciones estructurales sufridas por un horizonte de superficie sometido a una irrigación por aspersión por aguas saladas. El estudio se ha realizado en un suelo arcilloso-limoso del perímetro del Kalsât. Landelous, al norte del país. Ha permitido caracterizar la macroporosidad en los quince primeros centímetros, mediante análisis de imágenes en muestras de suelos sin modificar, observadas a tres escalas de resolución espacial. La porosidad se ha cuantificado por medio de un enfoque morfológico, teniendo en cuenta el tamaño y la forma de los poros, así como su espectro de porosidad. Comparando un horizonte trabajado sometido a la irrigación, y un horizonte sin trabajar y sin irrigación, se deduce que la macroporosidad es más importante después de la irrigación ; un análisis tipológico muestra que este aumento se debe a la creación de una porosidad muy basta, constituida por poros de ensamblaje entre los agregados, pudiéndose formar entre los mismos unos espacios de más de 5 mm. Confrontando estos resultados con las descripciones pedológicas, de terreno, se observa que la irrigación ha permitido pasar de una estructura poliédrica subangulosa, que presenta una porosidad esencialmente fisural y tubular, a una estructura granosa que presenta una porosidad intersticial importante entre los agregados.

Palavras claves

Macroporosidad, irrigación, estructura, análisis de imágenes.

Le développement de l'agriculture au Maghreb passe par la mise en valeur de nouvelles terres. L'exiguïté des terres et la rareté des eaux de bonne qualité ont cependant limité la possibilité d'étendre les surfaces irriguées. Les recherches menées en Tunisie ont montré qu'il est possible d'utiliser les eaux moyennement salines en irrigation sans grand risque en respectant certaines règles de gestion des eaux et des sols (CRUESI, 1970). Pourtant, plusieurs périmètres encourent des risques de dégradation de leurs sols, dans les zones caractérisées par une faible pluviométrie et une forte évaporation, une eau d'irrigation rare et salée, une nappe phréatique peu profonde et salée et une texture fine (Hachicha et al., 1994). La mise en valeur du périmètre irrigué de Kalaât Landelous, au nord de la Tunisie, où s'expriment tous ces facteurs, constitue une tentative de bonification de sols salés peu perméables par l'irrigation avec une eau de qualité moyenne (Bach-Hamba, 1992; Bouksila, 1992).

L'objectif de ce travail est de caractériser les modifications structurales induites par l'irrigation par des eaux saumâtres sur l'horizon de surface d'un sol argileux du périmètre de Kalaât Landelous. Cette caractérisation est effectuée par analyse d'images d'échantillons de sol non remaniés, observés à différentes échelles, sur lesquels la macroporosité est identifiée et paramétrée. La quantification de la macroporosité est établie selon deux méthodes : une typologie des pores à partir de leur taille et de leur forme, et des spectres de porosité en fonction de leur diamètre équivalent. Cette approche morphologique est confrontée à des mesures physiques de la porosité totale, et à des observations de terrain.

LE SITE

La plaine de Kalaât Landelous est située à 35 kilomètres au nord de Tunis sur la rive droite de l'Oued Mejerda. Elle est

constituée d'alluvions fluviales gagnées sur la mer au cours du dernier millénaire (Kalaï, 1985). Elle couvre une superficie d'environ 7500 ha, l'altitude y est comprise entre 0 et 5 m. Le climat est de type méditerranéen semi-aride supérieur, avec un hiver doux et tempéré et un été chaud et sec (Bach Hamba, 1992); la pluviométrie moyenne annuelle est de 470 mm. Le déficit hydrique climatique annuel est d'environ 900 mm; il se situe entre mars et octobre, avec un maximum de 200 mm en juillet.

L'étude pédologique de la région (Mori, 1968; DRES, 1981) a permis de distinguer des sols peu évolués d'apport fluvial, des sols halomorphes et des sols hydromorphes. Les textures y sont argileuses à argilo-limoneuses et l'analyse minéralogique y fait apparaître une prédominance de smectites.

Une nappe oscille entre 0,70 m et 2 m, avec une conductivité électrique variant entre 20 et 50 ms/cm (Rodier et al., 1981). Dans la zone aval, la nappe est très influencée par la mer.

L'aménagement hydro-agricole du périmètre de Kalaât Landelous de 3000 ha, a été entrepris entre 1986 et 1987. Il a consisté en l'installation d'un réseau d'irrigation et de drainage. Le drainage est destiné à maintenir la nappe à un niveau inférieur à 1,40 m et à permettre la lixiviation des sels. L'irrigation est effectuée par aspersion après pompage dans l'Oued Mejerda. L'aménagement permet ainsi l'installation de cultures maraîchères, fourragères et céréalières.

LE MATÉRIEL

Notre analyse a été effectuée sur une parcelle expérimentale de 400 m², subdivisée en plots de 5 m x 5 m, située à 1 km de la mer. Elle présente des sols peu évolués à caractères vertiques et halomorphes en profondeur (Xérofluents), caractéristiques du périmètre. Le tableau 1 présente pour l'en-

Tableau 1 - Caractéristiques analytiques du sol sur la parcelle d'étude.

Table 1 - Soil analytical characteristics of the studied plot.

Profondeur cm	Distribution granulométrique /µm					Matière organique %	Calcaire		Conductivité électrique dS.m ⁻¹
	< 2	2-20	20-50	50-200	200-2000		total	actif	
			%				%		
0-15	32	27	23	18	0	0,7	47	23	2,5
15-28	45	43	9	3	0	0,7	39	23	2,2
28-57	47	37	12	3	1	0,7	40	31	4,4
57-72	35	34	24	7	0	0,5	43	27	6,8
72-98	24	32	29	12	2	0,4	46	21	8,8
98-105	21	20	19	28	12	0,2	45	18	6,6
105-140	7	3	3	53	32	0,2	33	5	-

semble du profil la granulométrie, les teneurs en calcaire et en matière organique, et la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée mesurée selon la méthode USSL (1954). La texture est argileuse sur les 70 premiers centimètres. Au delà de cette profondeur, d'autres dépôts de texture plus grossières apparaissent.

Notre étude a permis de comparer deux plots voisins, l'un irrigué et occupé par une culture de maïs, l'autre constituant un témoin non irrigué. L'irrigation a été apportée en une trentaine de fois au cours de la saison de végétation, chaque irrigation ayant duré de 5 à 10 heures avec un débit d'environ 6 mm.h^{-1} . Les eaux d'irrigation présentent un faciès chloruré sodique, leur conductivité électrique varie de 2,7 à $3,5 \text{ mS.cm}^{-1}$ entre juin et septembre. Elles possèdent un SAR égal à 6,1 et un pH de 7,5.

La comparaison entre la situation irriguée et la situation témoin a été effectuée 4 mois après la mise en irrigation, après la récolte du maïs. Des mesures de porosité totale ont été effectuées par densimétrie au cylindre de 250 cm^3 . Un échantillon de sol non perturbé (hauteur 15 cm, largeur 9 cm, épaisseur 5 cm) a été prélevé sur l'horizon de surface de chaque plot. Sur le plot irrigué, Hachicha (1998) a noté la présence à la surface du sol d'une fine croûte de battance, craquelée; cette croûte n'a pas été prélevée. Les échantillons ont été imprégnés dans une résine (Scott-Bader Crystic) contenant un pigment fluorescent (Ciba-Geigy Uvitex OB), à la concentration de 1 g.l^{-1} selon le protocole décrit par Murphy et al. (1977). Après induration, les échantillons ont été découpés selon un plan vertical de façon à présenter une section polie.

MÉTHODE DE MESURE DE LA POROSITÉ PAR ANALYSE D'IMAGES

Acquisition et segmentation d'images

La porosité sur les surfaces polies a été étudiée par analyse d'images sur station SUN avec le logiciel Noesis Visilog, l'acquisition des images étant effectuée au moyen d'une caméra CCD Sony. L'acquisition est réalisée sous éclairage ultraviolet à 365 nm, de façon à exciter le pigment fluorescent. Chaque image est numérisée en 768×576 pixels, selon une trame hexagonale, avec une résolution spectrale de 256 niveaux de gris.

Pour chaque échantillon 6 images ont été saisies à 3 échelles d'analyse : l'échelle 1 correspond à une résolution spatiale de $10 \mu\text{m}$ par pixel, le champ analysé est de $7,7 \text{ mm} \times 5,6 \text{ mm}$; l'échelle 2 correspond à une résolution spatiale de $50 \mu\text{m}$ par pixel, le champ analysé est de $38 \text{ mm} \times 29 \text{ mm}$; l'échelle 3 correspond à une résolution spatiale de $100 \mu\text{m}$ par pixel, le champ analysé est de $77 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$. Trois images ont été saisies à l'échelle 1, deux images à l'échelle 2, une

image à l'échelle 3.

Sur les images en niveaux de gris la porosité apparaît en clair sur fond sombre. Leur segmentation, destinée à distinguer les pores de la matrice solide, fait appel à une technique de binarisation décrite par Hallaire (1994) où un seuillage sur les niveaux de gris est complété par une transformation de morphologie mathématique, la transformation « tophat » (Serra, 1982) avec ouverture morphologique par des éléments structurants hexagonaux de taille 3 pixels. Cette procédure permet d'effectuer un seuillage localisé, et notamment de détecter des pores fins au sein d'une matrice peu contrastée.

Quantification de la porosité

Macroporosité totale

Sur l'image binaire résultant de la segmentation, la macroporosité est quantifiée par le nombre de pixels appartenant aux pores. Ramenée à la surface totale de l'image, cette grandeur est exprimée en porosité surfacique.

Typologie des pores

Chaque pore reconnu sur l'image est individualisé et quantifié au moyen de deux paramètres caractérisant sa taille et sa forme. La taille du pore est estimée par l'aire a de sa section sur l'image (en pixels, ramenée en mm^2). Sa forme est estimée par l'indice d'allongement e (Coster et Chermant, 1985), mesuré à partir de son aire et de son périmètre :

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

Cet indice prend la valeur minimale 1 pour un pore parfaitement rond, il est d'autant plus grand que le pore est allongé.

Les paramètres de taille et de forme ont été combinés de façon à établir une typologie morphologique des pores (Hallaire et Cointepas, 1993). A chaque échelle d'analyse, trois classes de taille sont définies (petits, moyens et gros pores). De même, les pores sont classés suivant leur indice d'allongement en trois classes de forme (arrondis, intermédiaires, allongés). Cette classification est basée sur la distinction des pores en trois catégories : la forme arrondie (e inférieur à 2,5) correspond aux pores biologiques, trous de vers ou trous de racines; la forme intermédiaire (e compris entre 2,5 et 10) correspond aux petites fissures; la forme allongée (e supérieur à 10) correspond à la porosité d'assemblage.

Le croisement des deux paramètres permet de définir 9 classes de « taille-forme » à chaque échelle d'analyse, soit 27 classes au total. Le tableau 2 indique les valeurs de a et de e correspondant à ces classes morphologiques; on constate qu'il y a recouvrement entre les classes de taille d'une échelle à l'autre, mais cette procédure permet de couvrir une très large gamme de porosité, les diamètres équivalents des pores analysés étant compris entre $10 \mu\text{m}$ et 6 mm .

Spectre de porosité

Tableau 2 - Classification des macropores suivant leur taille et leur forme
 Table 2 - Classification of the macropores according to their size and shape

	aire du pore a	indice d'allongement du pore e		
		e < 2,5	2,5 < e < 10	e > 10
Echelle 1 : 10 µm/pixel	a < 0,05 mm ²	A1	A2	A3
	0,05 mm ² < a < 0,5 mm ²	B1	B2	B3
	a > 0,5 mm ²	C1	C2	C3
Echelle 2 : 50 µm/pixel	a < 0,25 mm ²	D1	D2	D3
	0,25 mm ² < a < 2,5 mm ²	E1	E2	E3
	a > 2,5 mm ²	F1	F2	F3
Echelle 3 : 100 µm/pixel	a < 0,5 mm ²	G1	G2	G3
	0,5 mm ² < a < 5 mm ²	H1	H2	H3
	a > 5 mm ²	I1	I2	I3

Une méthode de caractérisation du spectre de porosité est utilisée pour quantifier l'ensemble de l'espace poral, et non plus, comme dans le cas précédent, à travers l'individualisation de chaque pore. Cette méthode peut être assimilée à une « granulométrie » interne à la porosité. Elle vise à estimer le pourcentage relatif de l'espace poral dans lequel un disque de diamètre donné peut être inscrit. Elle permet donc de quantifier, au sein d'un pore, les cavités en fonction de leur taille, et de les distinguer des goulots d'étranglement.

La procédure utilisée pour obtenir ce spectre de porosité considère l'ensemble dans R² de la porosité, à partir de l'image binaire; on cherche dans cet ensemble les sous-ensembles dans lesquels un « élément structurant » est inscriptible. La méthode est basée sur une opération de morphologie mathématique : l'ouverture morphologique. Elle consiste à effectuer des itérations d'ouvertures avec des éléments structurants de taille croissante. L'image binaire étant digitalisée en trame hexagonale, l'élément structurant correspondant à une ouverture de taille n est un hexagone de diamètre 2n + 1 pixels. Après chaque itération, l'aire de l'image résultant de l'ouverture correspond à la porosité dont le diamètre équivalent est supérieur ou égal à cet hexagone. Il en résulte une courbe de porosité cumulée en fonction du diamètre équivalent des pores, que l'on peut transformer en spectre de porosité surfacique par intégration.

La figure 1 illustre la procédure suivie; cet exemple correspond à la plus forte résolution (échelle 1). La figure 1a représente l'ensemble de la porosité, en noir. La figure 1b représente, en grisé, le résultat des ouvertures hexagonales après 12 itérations; les zones restant en noir correspondent aux parties des pores dont le diamètre de constriction est infé-

rieur à 250 µm. La figure 1c représente le résultat des ouvertures après 30 itérations; les zones en noir correspondent aux parties des pores dont le diamètre de constriction est inférieur à 610 µm.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Analyse globale de la porosité

Les mesures de densité apparente montrent que l'irrigation entraîne une légère augmentation de porosité totale, qui passe de 44,3 % sur le plot non irrigué à 49,0 % sur le plot irrigué. Ce résultat confirme les observations de terrain (Hachicha, 1998) : hormis une croûte de battance sur les premiers millimètres, l'horizon de surface est plus poreux après irrigation.

La figure 2 représente les résultats de macroporosité issus de l'analyse d'images. Ces résultats montrent d'importantes différences entre le plot témoin et le plot irrigué pour les échelles les plus grossières, où la macroporosité en conditions irriguées est deux fois plus élevée qu'en situation non irriguée : on passe de 12,9 % à 30,6 % à l'échelle 2, et de 13,3 % à 25,3 % à l'échelle 3. Par contre il n'y a pas de différence à l'échelle la plus fine où la macroporosité représente 15 % dans les deux situations. Ces résultats montrent donc que l'irrigation conduit à la formation d'une macroporosité importante, celle-ci pouvant doubler; mais seuls les macropores les plus grossiers sont concernés par cette augmentation, puisqu'elle n'est pas décelable à forte résolution sur des champs réduits. Cette première analyse nous montre ainsi la nécessité de décrire plus finement la macroporosité, à travers une classification morpho-

Figure 1 - Résultat des ouvertures morphologiques sur une image binaire de la porosité (a) après 12 itérations (b) et 30 itérations (c). Les zones en gris correspondent aux fractions de pores de diamètre supérieur respectivement à 250 μm et 610 μm .

Figure 1 - Resulting images of morphological opening on a binary image of pore space (a) after 12 iterations (b) and 30 iterations (c). Grey areas correspond to pore fractions with a diameter higher than 250 μm and 610 μm , respectively.

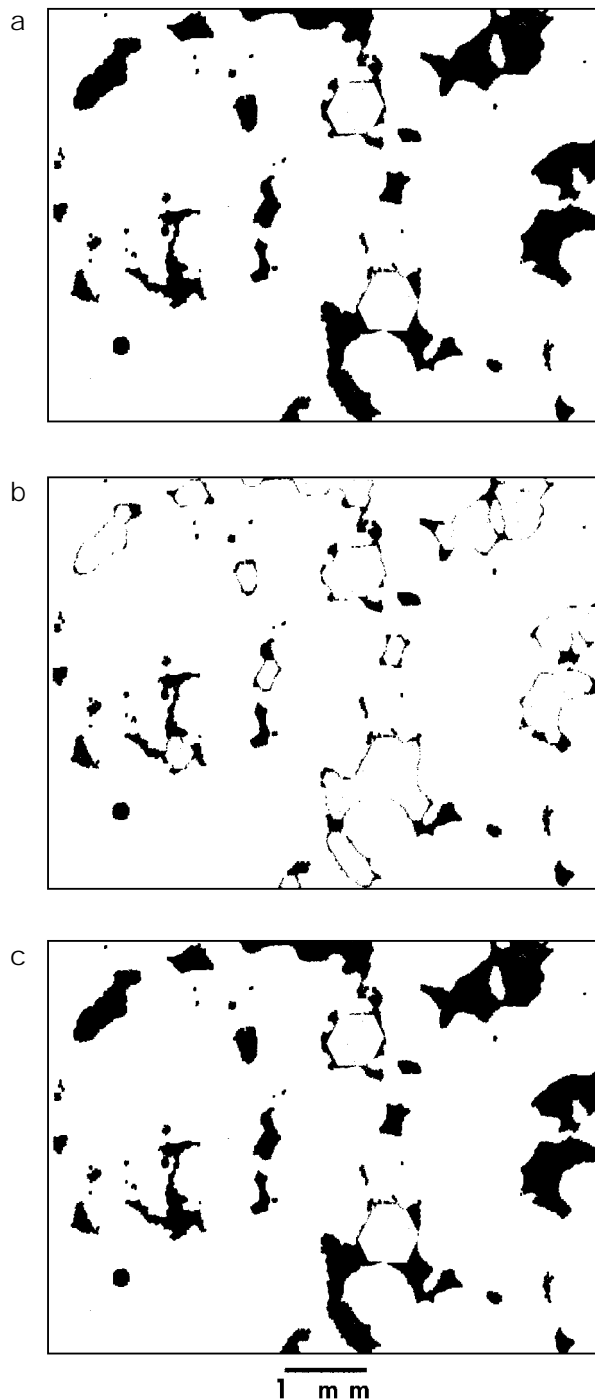
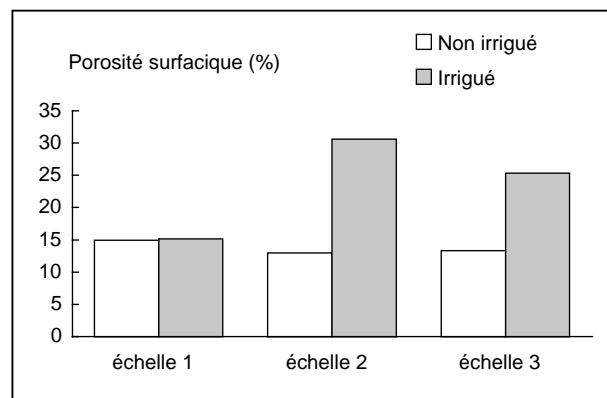


Figure 2 - Porosité surfacique mesurée à 3 échelles par analyse d'images.

Figure 2 - Surfacic porosity measured using image analysis at 3 scales.



logique à différentes échelles.

Typologie des pores

La figure 3 présente les histogrammes de macroporosité en non irrigué et en irrigué, les macropores étant répartis en 27 classes de taille et de forme.

On constate que seules les classes de taille F et I présentent des différences notables, les autres classes étant très semblables, aussi bien quantitativement que qualitativement. Les classes F et I correspondant aux pores les plus grossiers observés aux échelles 2 et 3 (respectivement supérieurs à 2,5 mm^2 et 5 mm^2), on confirme ici que l'irrigation a conduit à une augmentation de porosité par création de très gros macropores, sans que les classes de macropores intermédiaires soient affectées.

En ce qui concerne la forme des macropores, on montre que les pores arrondis et de forme intermédiaire, c'est-à-dire les pores biologiques et les fissures, varient peu d'une situation à l'autre. Par contre les pores d'assemblage constituent l'essentiel de l'augmentation de porosité due à l'irrigation : la porosité d'assemblage passe de 9 % à 36 % après irrigation, et cette augmentation est encore plus importante dans les classes de taille F et I, où cette porosité d'assemblage est respectivement multipliée par 13 (classe F3) et par 5 (classe I3).

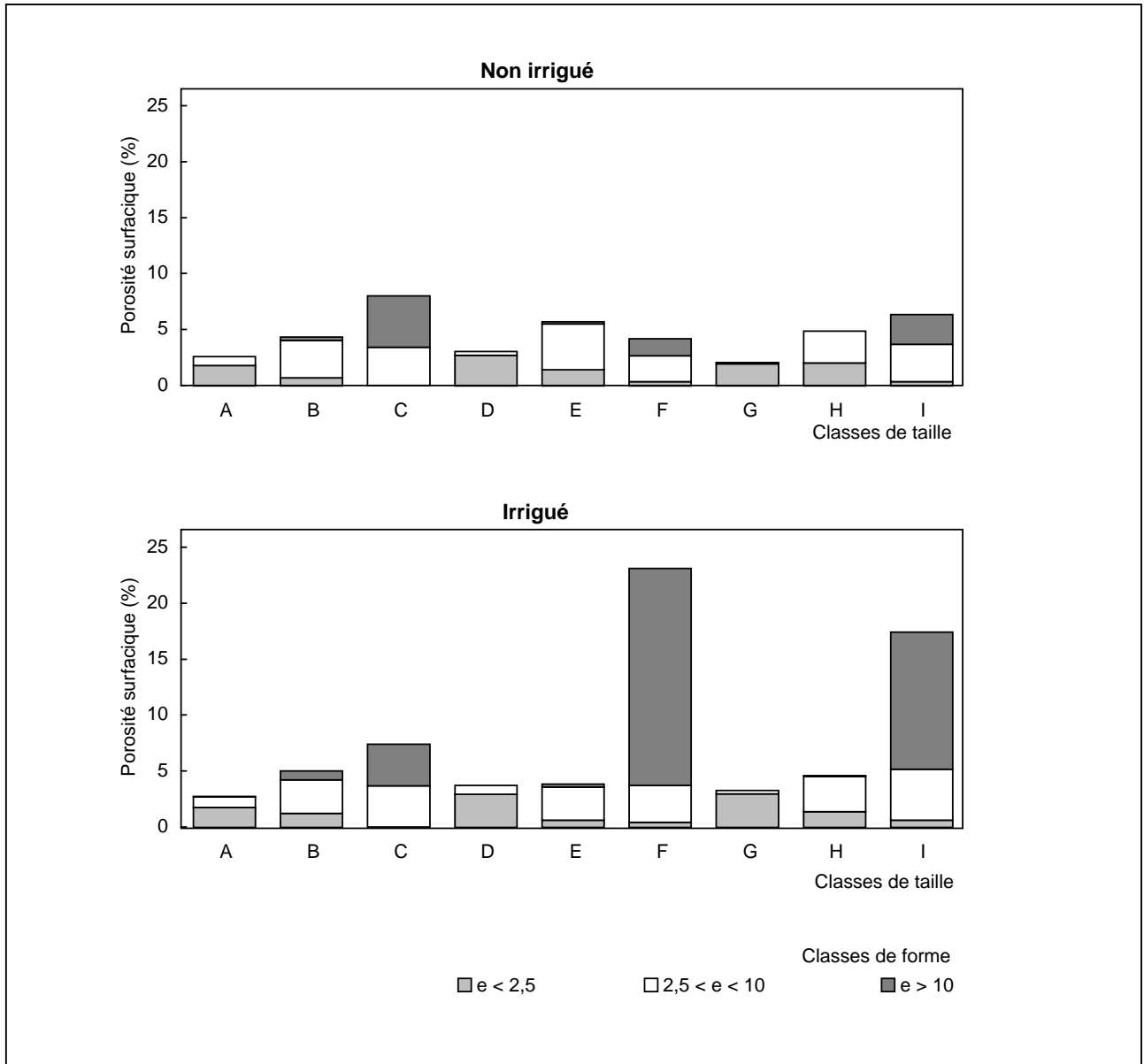
La différenciation entre les deux situations consiste donc en un réarrangement macroscopique des agrégats, ceux-ci laissant entre eux un assemblage plus lâche après irrigation sans modification de la porosité intra-agrégat.

Spectres de porosité

La figure 4 présente les spectres de porosité des deux situations, aux trois échelles d'analyse. Ils expriment le pour-

Figure 3 - Typologie des macropores selon leur taille et leur forme en situations non irriguée et irriguée.

Figure 3 - Macropore typology according to their size and shape in non irrigated and irrigated situations.



centage de porosité correspondant à chaque diamètre équivalent de pore.

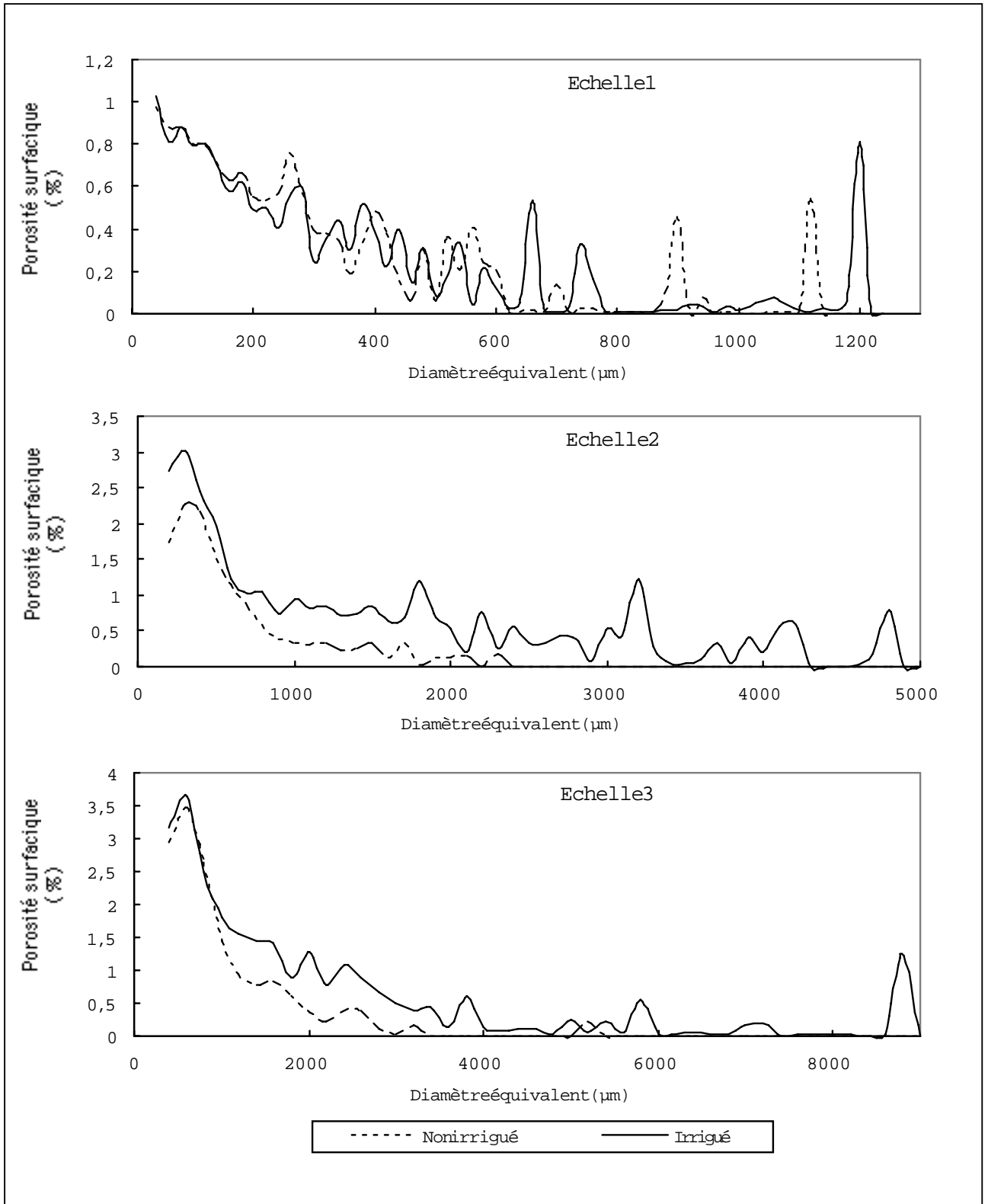
A l'échelle la plus fine, les différences entre la situation irriguée et la situation non irriguée n'apparaissent pas pour les pores les plus fins : les deux courbes sont étroitement semblables pour les diamètres équivalents inférieurs à 600 μm . Les pics de porosité entre 600 μm et 1200 μm sont généralement plus élevés et plus nombreux en irrigué qu'en non irrigué, mais la différence reste faible.

A l'échelle intermédiaire, le spectre de porosité en situation irriguée apparaît très différent de la situation non irriguée, et cela sur l'ensemble de la courbe. Les différences les plus notables apparaissent pour les pores de diamètre équivalent supérieur à 1 mm : les pores compris entre 1 et 5 mm constituent une large part de la porosité en irrigué, tandis qu'ils sont pratiquement absents en condition non irriguée.

L'analyse à l'échelle 3 confirme cette tendance et montre qu'elle se poursuit pour les pores plus grossiers encore,

Figure 4 - Spectres de macroporosité aux 3 échelles d'analyse en situations non irriguées et irriguées.

Figure 4 - Macropore spectra at the 3 analysis scales in non irrigated and irrigated situations.



puisque des pores compris entre 5 et 10 mm de diamètre équivalent ont pu être détectés en situation irriguée.

L'ensemble de ces spectres, associé à l'analyse typologique de la porosité, renseigne sur les modifications structurales induites par l'irrigation sur la couche de surface. Une macroporosité est créée, résultant d'espaces interstitiels entre les agrégats. Ces espaces s'apparentent à une porosité d'assemblage, composée de vides de très grande taille, les agrégats pouvant être espacés de plusieurs millimètres. A l'inverse, la porosité en situation non irriguée est constituée principalement de fissures, en second lieu de pores tubulaires, et pour une faible part seulement de pores d'assemblage, avec des diamètres équivalents de pores principalement inférieurs à 1 mm, et même, pour la majorité d'entre eux, inférieurs à 600 μm . Ces résultats confirment ainsi les descriptions pédologiques de Hachicha (1998) sur le même site : une structure polyédrique subanguleuse, constituée de mottes d'environ 5 cm, est remplacée par une structure micro-grenue, constituée d'agrégats de moins de 1 cm.

La figure 5 illustre cette modification structurale : elle correspond à des images observées à l'échelle 2. La figure 5a, en situation non irriguée, montre une macroporosité composée de petits tubules et de microfissures délimitant des agrégats polyédriques serrés ; la figure 5b, en situation irriguée, montre une macroporosité d'empilement entre des agrégats arrondis et peu serrés.

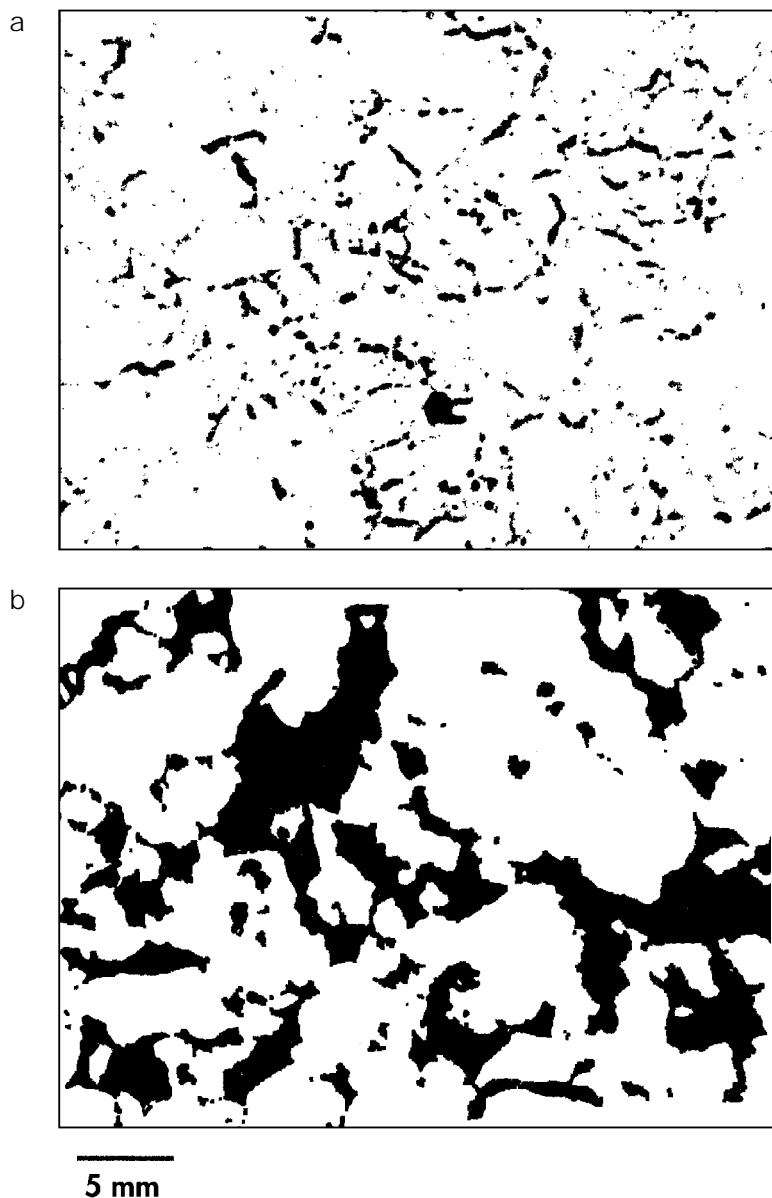
L'irrigation a donc abouti dans le cas présent à une amélioration de la structure de l'horizon de surface. La dégradation due à l'irrigation par aspersion n'a affecté que les premiers millimètres du sol, en créant une croûte de battance qui réduit l'infiltrabilité (Valentin et Ruiz Figueroa, 1987). Mais sous cette croûte l'horizon conserve la porosité créée par le travail initial du sol.

CONCLUSION

Une analyse de la macroporosité nous a permis d'étudier les modifications structurales liées à l'irrigation, sur la couche de surface d'un sol argileux du périmètre irrigué de Kalaât Landelous (Tunisie). L'étude a été réalisée par

Figure 5 - Macroporosité observée à l'échelle 2 en situations non irriguée (a) et irriguée (b).

Figure 5 - Macropore space observed at scale 2 in non irrigated (a) and irrigated (b) situations.



analyse d'images effectuée sur des échantillons de sol à structure conservée. La macroporosité, analysée à trois échelles, a été quantifiée grâce à une typologie établie à partir de la taille et de la forme de chaque pore, puis par des spectres de porosité permettant de définir le diamètre équivalent des différentes parties des pores. Ces résultats morphologiques ont été confrontés à une quantification physique de la porosité par densimétrie, et à une description pédologique des structures.

Là où la méthode physique montrait une légère augmentation de porosité totale après irrigation, l'analyse morphologique a permis de décrire qualitativement et quantitativement les modifications structurales. Les conditions d'irrigation ont augmenté considérablement la macroporosité de la couche de surface : cette augmentation résulte de la création d'une porosité interstitielle liée à un arrangement plus lâche entre les agrégats. Cette porosité constitue des voies de passage dont le diamètre peut dépasser 5 millimètres. Cette analyse morphologique confirme, en les quantifiant, les observations pédologiques : à une structure polyédrique succède une structure grenue.

L'approche morphologique, en apportant une caractérisation de la taille et de la forme des pores à différentes échelles, apparaît donc nécessaire pour compléter et quantifier les mesures physiques et les observations de terrain. Il conviendrait cependant d'affiner cette étude par une analyse plus précise des différents niveaux constituant la couche de surface, et notamment de prendre en compte les organisations pelliculaires de surface. Une telle approche pourrait être menée sur un protocole plus complet d'irrigation, afin de déterminer plus précisément le rôle des conditions d'irrigation (type, fréquence et salinité des apports) sur les modifications structurales. Elle permettrait également de déterminer le rôle relatif des processus mécanique et géochimique sur le changement de structure.

BIBLIOGRAPHIE

- Bach-Hamba I., 1992 - Bonification des sols : cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous. Caractérisation de la salinité initiale en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mémoire INAT, 170 p.
- 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. Mémoire INAT, 192 p.
- Coster M., Chermant J.L., 1985 - Précis d'analyse d'images. Editions du CNRS, Paris (F), 521 p.
- CRUESI- PNUD/UNESCO, 1970 - Recherche et formation en matière d'irrigation avec des sols salés, 1962-1969. Rapport technique.
- DRES, 1981 - Etude pédologique de l'extension du périmètre de Kalaât Landelous. E n°462. Division des Sols.
- Hachicha M., Job J.O., Mtimet A., 1994 - Les sols salés et la salinisation en Tunisie. Sols de Tunisie. Bulletin de la Direction des Sols n° 15, 270-341.
- Hachicha M., 1998 - Mise en valeur des sols salés. Organisation, fonctionnement et évolution de sols salés du Nord de la Tunisie. Thèse ENSAR/INRGREF, Rennes, 229 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 9th International Working Meeting on Soil Micromorphology* (AJ Ringrose-Voase, GS Humphreys, eds). Elsevier, Amsterdam (NL), 549-557.
- Kalaï S., 1985 - Contribution à l'étude de l'impact des aménagements hydrauliques sur la dynamique de l'embouchure de la Medjerda. DEA Université Tunis.
- Mori A., 1968 - Etude pédologique de l'URD d'Utique. DRES.
- Murphy C.P., Bullock P., Turner R.H., 1977 - The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. *Journal of Soil Science* 28, 498-508.
- Rodier A., Colombani J., Claude J., Kallel R., 1981 - Le bassin de la Medjerda. Monographies hydrologiques ORSTOM n° 6.
- Serra J., 1982 - Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London (GB), 610 p.
- USSL, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. *Agriculture Handbook* n° 60, USDA, 160 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, LM Bresson, MA Courty, eds). AFES, Plaisir (F), 401-408.