

# Evolution morphologique de sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride :

## L'exemple de la Basse-Moulouya (Maroc)\*

Clément MATHIEU (1) et Alain RUELLAN (2)

(1) Administration Générale de la Coopération au Développement en Belgique, rue Firmin Tarrade 87130 Châteauneuf-La-Forêt.  
(2) ORSTOM, 213, rue La Fayette 75010 PARIS. Adresse actuelle : 66, rue Condorcet, 75009 Paris.

### RÉSUMÉ

*Dans les plaines arides et semi-arides de la Basse Moulouya (nord-est du Maroc) l'évolution de sols calcimorphes, en fonction des modalités d'une agriculture irriguée intensive (irrigation gravitaire), a été suivie pendant 20 ans (1960-1980). La comparaison précise de deux sols cultivés, l'un non irrigué, l'autre irrigué, montre l'influence marquée de l'irrigation, principalement sur la morphologie des 50 premiers centimètres du sol : le système poreux est fortement modifié, mais aussi les caractères de structures, de couleurs, de traits pédologiques ; la microporosité est diminuée de 0 à 45 cm. Les transformations du sol irrigué sont fonction : du nombre d'années d'irrigation, des types de cultures et de préparations des sols, des modes d'irrigation, des types de sols (le calcaire freine l'évolution morphologique). Un certain nombre de leçons agronomiques sont tirées en terme de modalités de travail du sol et d'irrigation : les évolutions constatées sont manifestement néfastes pour la production agricole ; mais ces évolutions peuvent être freinées, voire orientées vers des voies positives, par l'utilisation d'autres méthodes culturales et d'irrigation.*

MOTS-CLÉS : Maroc — Sols irrigués — Profil cultural — Evolution de sols cultivés — Sols calcimorphes.

### ABSTRACT

MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF IRRIGATED SOILS IN THE SEMI-ARID MEDITERRANEAN ZONE : THE CASE OF LOWER MOULOUYA (MOROCCO)

*In the arid and semi-arid plains of Lower Moulouya (north-east Morocco), the evolution of calcimorphic soils as related to the irrigated intensive agriculture (gravity irrigation) has been studied for 20 years (1960-1980). The detailed comparison between two cultivated soils, the first one being irrigated and the other one not being irrigated shows the strong influence of irrigation mainly on the soil morphology of the first 50 centimetres : the porous system is largely modified as well as the structural features, the colours and the soil features ; microporosity decreases from 0 to 45 cm. The transformations suffered by the irrigated soil depend on the number of irrigation years, on the types of crops and soil preparations, on the methods of irrigation and on the types of soils (the morphological evolution is checked by limestone). A number of agronomic lessons are drawn concerning the soil tillage and irrigation : the evolutions observed are clearly harmful to the agricultural production, but these evolutions can be checked and even subjected to positive transformations by using other cultivation and irrigation methods.*

KEY WORDS : Morocco — Irrigated soils — Cultivated soil profile — Cultivated soil evolution — Calcimorphic soils.

\*Cette étude a été réalisée dans le cadre du Bureau de Pédologie de l'Office National des Irrigations puis de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de la Moulouya, Berkane, Maroc.

L'irrigation constitue pour les sols des régions arides une transformation profonde des conditions de leur évolution : le sol, qui a évolué depuis longtemps avec quelques centaines de millimètres d'eau pluviale par an, reçoit en effet brusquement, par les irrigations, entre 1 000 et 1 500 mm par an. Aussi ne faut-il pas s'étonner, qu'après plusieurs années d'irrigation, les sols présentent des transformations morphologiques et chimiques importantes qui permettent de les différencier des sols non irrigués.

La réalisation d'un périmètre irrigué de 70 000 hectares, comme celui de la Basse-Moulouya au Maroc, demande des investissements considérables qu'il s'agit de valoriser, non seulement au mieux, mais au maximum. Or, les observations que l'on peut faire sur l'évolution des sols irrigués montrent que, selon les modes de culture (travail du sol, assolements,...) et d'irrigation, cette évolution peut constituer un frein plus ou moins important à la productivité des zones irriguées. Il est donc très important de se pencher sur ce problème :

- quels sont les caractères pédologiques qui se transforment par rapport au sol non irrigué ;
- quelles sont les causes et le déroulement des transformations ;
- quelles en sont les conséquences pour le comportement actuel du sol, du point de vue de son utilisation et de sa productivité ;
- quelles sont les précautions qu'il faut prendre pour freiner, voire éviter, les évolutions négatives et favoriser les évolutions positives.

Pendant vingt ans (1960-1980), nous avons pu observer et mesurer certains aspects de l'évolution des sols irrigués de la Basse-Moulouya, en fonction des systèmes de culture et d'irrigation gravitaire. Nous résumons dans le présent article l'essentiel des données récoltées et des leçons que nous en tirons.

## 1. LE PÉRIMÈTRE IRRIGUÉ DE LA BASSE-MOULOUYA

La Basse-Moulouya est située à l'extrémité nord-est du Maroc, en bordure de la Méditerranée, à proximité de l'Algérie (Fig. 1).

A. Le **climat** des plaines est du type méditerranéen semi-aride, tempéré dans la partie est (classification d'EMBERGER, 1955), avec une aridité plus prononcée dans sa partie ouest. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 375 mm à l'est à 200 mm à l'ouest, avec des variations importantes suivant les années. Le nombre de jours de pluie varie de 35 à 50 par an avec un maximum de précipitation de décembre à avril. La température moyenne annuelle est de 18,2° C à Berkane.

B. La majorité des **sols** de ces plaines sont, d'après la classification française (CPCS, 1967), des sols isohumiques à pédo-climat frais pendant les saisons pluvieuses, groupes des sols marron et siérozems à granules et nodules calcaires et encroûtés. Après les travaux de BRYSSINE (1946), De CHEVRON VILETTE (1956), HEUSCH (1960) et MASSONI (1962, 1963, 1964), ils ont été étudiés en détail par RUELLAN (1963, 1965, 1971) qui les a dénommés sols à profil calcaire différencié. Ces sols sont développés dans des formations colluviales du Quaternaire provenant pour l'essentiel des zones montagneuses environnantes.

Les sols irrigués sont principalement :

- des sols à profil calcaire moyennement différencié (amas friables et nodules)
  - peu ou non calcaire en surface (sol marron),
  - calcaire dès la surface (siérozem) ;
- des sols à profil calcaire très différencié (encroûtement, croûte et dalle)
  - peu ou non calcaire en surface (sol marron),
  - calcaire dès la surface (siérozem).

D'après la *Soil Taxonomy* (1975), selon les régimes hydriques des sols des différentes plaines et selon la présence ou l'absence d'un horizon B argilique et/ou calcique, les sols sont, selon les cas, des : haplargids, camborthids, calciothids, paléorthids, rodoxérafals, haploxérafals, xérochrepts, rhodustalfs, haplustafs, ustrochrepts.

Selon la légende FAO-Unesco (carte mondiale des sols 1974), les sols sont, selon les cas : des rendzines, des xérosols luviqes et calciques, des yermosols luviqes et calciques, des luvisols calciques et chromiques, des cambisols calciques et chromiques.

C. Le développement de l'**agriculture irriguée**, commence vers 1930 avec le forage de nombreux puits. Mais ce n'est qu'à partir de 1956, puis 1964, dates de mise en route des grands barrages, que l'irrigation se développe vraiment, d'abord dans les Triffa, puis dans les autres plaines (Zebra, Bou-Areg, Garet).

Aujourd'hui 70 000 ha sont aménagés (défrichés, épierrés, nivelés, remembrés) et irrigués. Les principales productions sont (données de 1980) :

- les cultures maraîchères sur 16 000 ha ; quatre cultures viennent en tête : la pomme de terre, le haricot sec, le melon-pastèque et l'artichaut ;
- les céréales, de 12 à 14 000 ha selon les années ;
- un verger agrumicole de 12 000 ha, dont 60 % de clémentines ;
- d'autres cultures arboricoles, principalement sur les sols médiocres (calcaires avec encroûtement) : l'olivier (1 000 ha), l'abricotier (500 ha), le pêcher, le nectarien, le néflier, le poirier et le pommier ;
- la vigne, avec 1 800 ha de raisin de table et 1 200 ha de raisin de cuve ;
- la betterave à sucre sur environ 8 000 ha ;

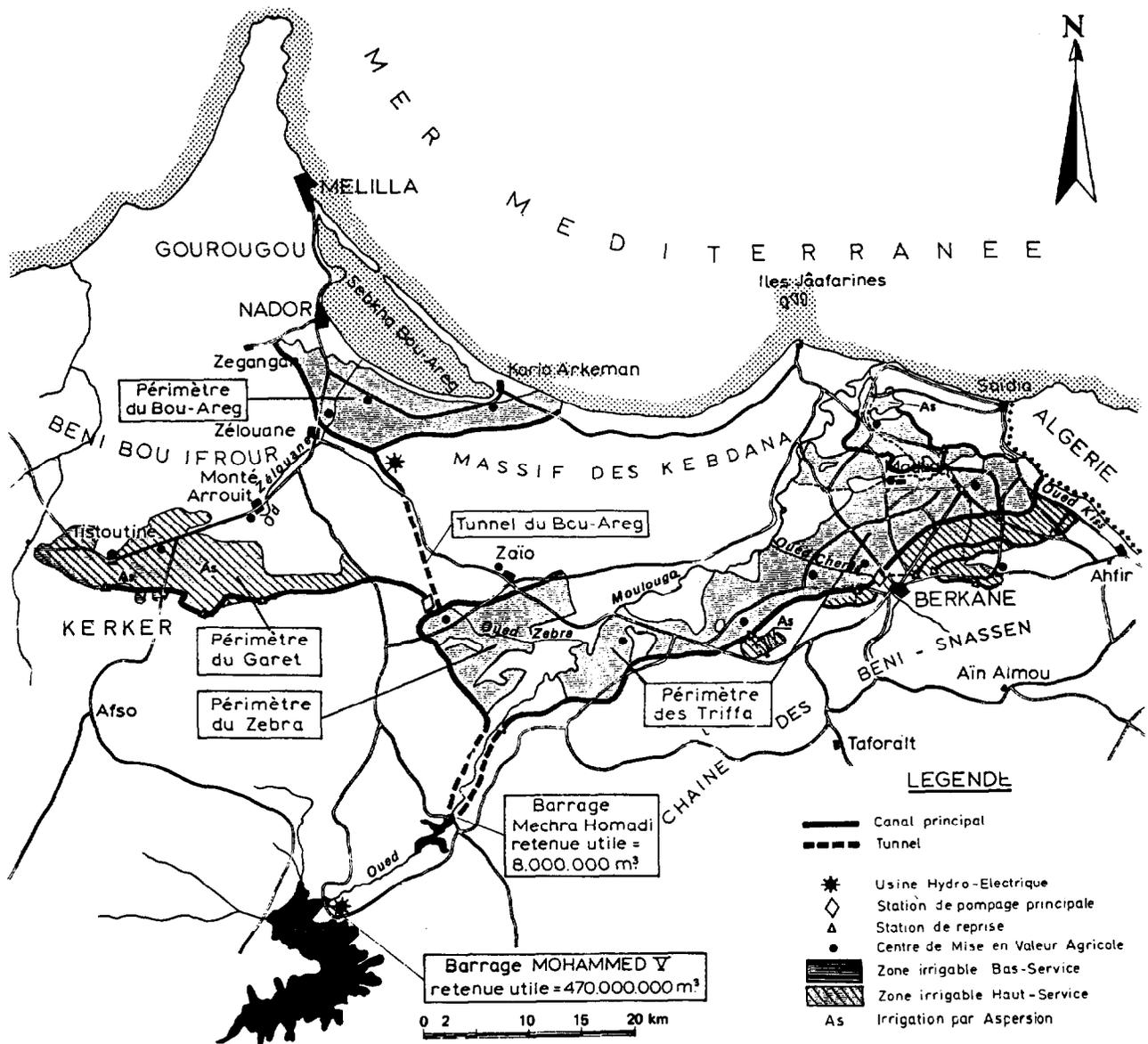


FIG. 1. — Le périmètre irrigué de la Basse-Moulouya

- la canne à sucre, 1 000 ha ;
- l'élevage et les cultures fourragères : 3 400 ha dont 200 ha de luzerne ;
- les cultures spéciales, groupant le tournesol (de bouche), la niora, les plantes à parfum et la framboise.

D. **L'eau d'irrigation**, provenant de la Moulouya, est légèrement salée ; elle se classe entre les eaux chlorosulfatées calciques et magnésiennes et les eaux carbonatées calciques et magnésiennes. Le maximum de salinité, atteint chaque année à la fin de l'été ou au début de l'automne, varie de 900 à 1 600 mg/l ; le mini-

um (hiver ou début du printemps) se situe vers 350 à 500 mg/l. D'après les données de l'U.S. Salinity Bureau (RICHARD, 1954), l'eau de la Moulouya se place dans la classe C3 : elle peut donc provoquer une salinisation assez rapide des sols, limiter les rendements des plantes sensibles aux sels (agrumes, haricots) et même limiter, par action au moment de la germination, les rendements des plantes plus résistantes, telles que la betterave, la luzerne... Cependant avec des S.A.R. de 2 à 3, elle se classe en catégorie S1 : c'est donc une eau qui ne présente aucun danger alcalisant du complexe adsorbant des sols.

E. **Les modes d'irrigation traditionnelle**, largement utilisés, sont de deux types bien distincts :

— le type billon-raie : le sol est billonné, la plante est cultivée sur le billon et l'eau d'irrigation coule dans la raie ;

— le type submersion : le sol est plané et l'eau d'irrigation inonde toute la surface cultivée.

Les systèmes les plus fréquemment utilisés sont les suivants :

a) *Le bassin billonné ou « robta »* (photo 1). Extrêmement répandue en Afrique du Nord, la robta (1) est une surface fermée, de petites dimensions (4 m × 5 m), enfermant 3 à 5 billons, irriguée par remplissage jusqu'à mi-hauteur ou plus des billons. L'eau est amenée dans la robta par de longues raies transversales, tous les 6 m. Ce mode d'irrigation a été d'abord développé en montagne, dans les systèmes en terrasses ; il a été transposé dans la plaine tel quel par les agriculteurs. Il présente l'avantage indéniable de s'accommoder des pentes et des micro-reliefs accentués. Mais il présente aussi de nombreux défauts, tant au niveau de l'exploitation qu'au niveau du sol : nécessité d'une main-d'œuvre importante pour le maniement de l'eau ; il ne permet de pratiquer que des doses approximatives et souvent surestimées ; il y a perte de 8 à 12 % de surface de terrain du fait des raies transversales ; il y a impossibilité de mécaniser les entretiens et les récoltes ; il y a dégradation du nivellement initial et transformation rapide de la structure du sol avec apparition d'un horizon compact important que nous allons décrire par la suite.

b) *La planche fermée* (photo 2). Les agriculteurs utilisent la planche fermée pour l'irrigation des fourrages (luzerne, bersim, maïs), des céréales, des pépinières et certains légumes (carottes, navets, menthe). Ces planches ont en général des dimensions modestes : 6 m de large et 12 m de long pour les plus grandes et l'irrigation se fait par submersion en eau dormante. Cette méthode, très largement répandue, s'avère dégradante pour la structure du sol, et tout spécialement lors de la culture de la luzerne du fait que celle-ci occupe le sol au minimum 4 ans sans le moindre travail du sol. Un avantage de la méthode est de limiter l'érosion au niveau de la parcelle (ce qui est vrai également pour la robta).

c) *L'irrigation des arbres* (photo 3). Le système de double cuvette individuelle pour chaque arbre a été pratiquement le seul système utilisé jusqu'à ces dernières années. La cuvette est constituée de deux bourrelets concentriques délimitant la surface à arroser. Le bourrelet intérieur est une protection du tronc contre le passage

de l'eau pour prévenir la gommose. Par ce système, on obtient une répartition homogène de l'eau si le fond de la cuvette est bien nivelé. Il permet également de maîtriser de fortes doses et, par ces fortes doses, de favoriser le lessivage des sels. Par contre, le système est grand consommateur d'eau et comme il s'agit d'un système de submersion par eau dormante il risque aussi de dégrader la structure et de provoquer une insuffisance d'aération du sol.

F. **Les méthodes de travail du sol** les plus fréquemment utilisées sont les suivantes :

a) Pour le *labour*, le seul outil utilisé est la charrue portée à 3 disques non réversibles, obligeant à pratiquer un labour en planches. Les labours sont en général peu profonds (10 - 15 cm) et au niveau de la parcelle la profondeur varie très peu d'une culture à l'autre. Les labours sont souvent exécutés sur des sols très secs, sans pré-irrigation.

b) Après le labour, un travail est nécessaire pour réduire les grosses mottes, de tailles et formes irrégulières : en climat méditerranéen aride, on ne peut, en effet, compter sur les pluies et le gel pour faire ce travail. Un *pseudo-labour* est donc nécessaire : il est, très généralement, effectué à l'aide d'un pulvérisateur en V, le « *cover crop* » (que certains utilisent comme seul outil de labour). Ce travail, après labour, est souvent effectué sur un sol très sec : les mottes sont alors réduites en une poussière très fine, la surface du sol étant transformée en une « farine » contenant quelques mottes très dures que les travaux de pseudo-labour n'ont pu détruire.

G. Des **améliorations foncières** sont effectuées avant (défrichement, défoncement, nivellement) et pendant (sous-solage) la culture irriguée.

a) *Le défoncement* : il s'agit d'un labour très profond (70 - 80 cm) effectué à l'aide d'une charrue-balance. L'objectif principal est d'aérer, de décompacter le sol avant toute mise en valeur. Il ne peut être effectué que sur les sols ne présentant aucune accumulation de calcaire en profondeur.

b) *Le défrichement* : il s'agit, à la fois, de détruire les arbustes (principalement le jujubier) et d'ameublir le sol. Deux outils sont utilisés :

- le « *ripper* » : sous-soleuse à 1, 2 ou 3 dents travaillant à 70-90 cm de profondeur ; ce travail est en particulier très utile pour briser certaines croûtes calcaires situées à faible profondeur (le sous-solage est alors suivi d'un épierreage) ;

(1) *Robta* : mot arabe qui signifie « rassembler quelque chose en liant, en emprisonnant », par ex. : lier une liasse de billets de banque, un bouquet de menthe ; d'où la similitude avec l'eau : « emprisonner l'eau dans un bassin ».

EXEMPLES DE MODES D'IRRIGATION

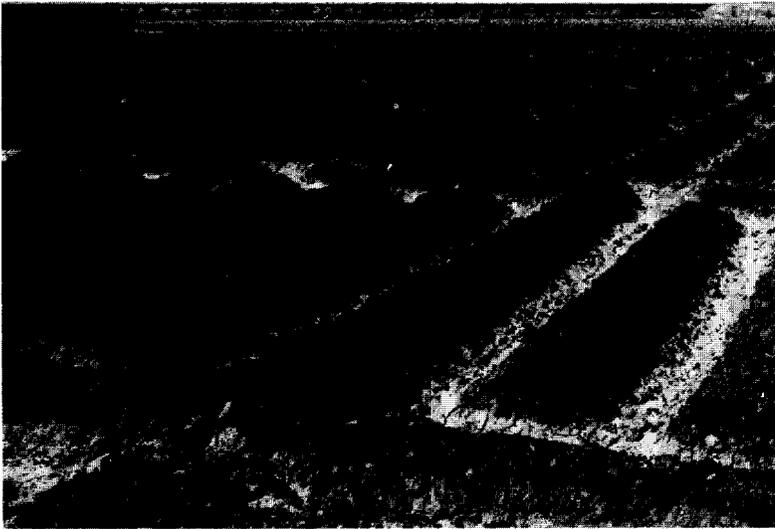


PHOTO 1. — Profilage en billons et raies courtes « robtá ».



PHOTO 2. — Submersion en planches fermés pour céréales ; noter le « glacage » de la surface à l'avant-plan.



PHOTO 3. — Submersion avec doubles cuvettes dans une plantation d'agrumes.

- le « *root-plow* » : sous-soleuse à lame plate horizontale travaillant à 60-80 cm de profondeur ; cet outil ne peut être utilisé que dans des sols non encroûtés ; il est très efficace pour arracher le jujubier et ameublir l'ensemble du sol.

c) *Le nivellement* : il s'agit de réduire les irrégularités de la surface du sol et de diminuer certaines pentes. Ce travail, s'il n'est pas fait avec soin, présente deux dangers :

- la multiplication des passages d'outils sur des sols très secs détruit les structures pédologiques : la

« farine » devient de plus en plus fine et épaisse et cela aura des conséquences graves dès que l'on irriguera (formation de mottes et d'horizons très compacts) ;

- l'amincissement des sols : si le nivellement conduit à enlever, en certains endroits, plus de 20 cm de terre, on réduit considérablement le potentiel organique et biologique de départ et on rapproche dangereusement de la surface du sol les horizons d'accumulations de calcaire situés, très souvent, dès 30-50 cm de profondeur.

d) *Le sous-solage* : sur sol irrigué depuis plusieurs années, il est en général nécessaire d'essayer d'amélio-

rer la structure du sous-sol pour favoriser l'implantation racinaire ; il s'agit en particulier d'essayer de détruire les niveaux de tassement consécutifs à la culture irriguée. Pour réaliser cette amélioration, on pratique un sous-solage à 40-60 cm de profondeur, à l'aide d'appareils à dents fixes ou animées d'un mouvement vibrant qui fendent la terre sans remonter quoi que ce soit vers la surface.

## 2. COMPARAISON D'UN SOL NON IRRIGUÉ ET D'UN SOL IRRIGUÉ DEPUIS 13 ANS

Dès les premières années d'irrigation, l'observation morphologique du sol au terme de chaque culture, montre que d'année en année, le sol se modifie, d'abord dans les horizons de surface puis de plus en plus profondément. Au § 3 de cet article, nous montrerons quelles sont les principales étapes et quels sont les principaux facteurs de ces transformations. Avant cela, voyons, en comparant un sol non irrigué et un sol irrigué depuis 13 ans, quelles sont les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques qui se modifient au terme d'un temps relativement long d'irrigation.

L'exemple est pris dans la plaine des Triffa, à 2 km au sud de Berkane (pluviosité de 350 mm). Il s'agit, d'après A. RUELLAN (1971) d'un sol à profil calcaire moyennement différencié, non calcaire et argileux en surface (CPCS : sol marron à granules et nodules calcaires ; USDA : Xerochrept calcixerollique). La topographie est plane, la pente inférieure à 1 %.

### 2.1. La macromorphologie

#### 2.1.1. LE SOL NON IRRIGUÉ : DESCRIPTION D'UN PROFIL

+ 0 à 6/7 cm = horizon A1

- la surface est fermée par une croûte de battance de 2 mm d'épaisseur ;
- texture : limon moyen sableux ; non calcaire ;
- couleurs 5 YR 4/6 (sec) ;
- structure : assemblage d'agrégats arrondis (grenus, grumeleux), fins et moyens, et de quelques mottes polyédriques subangulaires, moyennes, à porosité moyenne (50 pores/dm<sup>3</sup>) et cohésion forte à l'état sec ; à l'état humide, la structure polyédrique subangulaire est dominante ; macroporosité interagrégat élevée ; forte activité biologique ; pseudo-mycéliums de calcaire fin.

+ 6/7 à 20/25 cm = horizon B1

- limite supérieure distincte et régulière ; si le sol est labouré (en sec) une structure lamellaire peu différenciée peut exister sur quelques millimètres d'épaisseur (semelle de labour) ;
- texture : limon argilo-sableux ; non calcaire ;
- couleur : 5 YR 3,5/6 (sec) ;
- structure : polyédrique subangulaire moyenne à l'état sec ; plus anguleuse et plus fine à l'état humide ; macroporosité élevée ; pseudo-mycéliums de calcaire fin.

+ 20/25 à 45/50 cm = horizon B2

- limite supérieure distincte à graduelle, régulière ;
- texture : argileux ; 5 % de calcaire fin ;
- couleur : 2,5 YR 3/4 (sec) ;
- structure : prismatique grossière (10 cm de haut) à sous-structure polyédrique très fine ; porosité inter et intra-agrégat moyenne (15 à 75 pores/dm<sup>3</sup>).

+ 45/50 à 75/80 cm = horizon Bca1

- limite supérieure distincte et régulière ;
- texture : argilo-calcaire ; 19 % de calcaire fin ; 10-15 % de nodules calcaires ;
- couleur : 2,5 YR 3/6 (sec) ;
- structure : prismatique moyenne à sous-structure polyédrique fine à moyenne ; porosité moyenne à faible.

+ 75/80 à > 130 cm = horizon Bca2

- limite supérieure graduelle et régulière ;
- texture : calcaire-limoneux ; 44 % de calcaire fin, 40 % de nodules calcaires ;
- couleur : 2,5 YR 3/6 (sec) ;
- structure : polyédrique et polyédrique subangulaire, fine à très fine ; porosité inter et intra-agrégat faible (moins de 15 pores/dm<sup>3</sup>).

Le tableau I résume les principales données analytiques de ce sol.

#### 2.1.2. LE SOL IRRIGUÉ DEPUIS 13 ANS : DESCRIPTION D'UN PROFIL

Situé à proximité du précédent, ce sol a connu depuis 13 ans les principales cultures irriguées suivantes : luzerne, blé, betterave sucrière, coton, haricot.

Le sol est décrit après une culture de blé, avant déchaumage (juillet 1974).

+ 0 à 7/10 cm = horizon Ap1

- en surface, croûte de battance de quelques millimètres d'épaisseur ;
- texture : argileux ;
- couleur : 5 YR 4/4 (sec) ;
- structure : prise en masse continue d'agrégats grenus non poreux de 1-2 mm, d'agrégats grumeleux poreux de quelques millimètres, de mottes polyédriques subangulaires compactes très peu poreuses de quelques centimètres, d'éléments particuliers ; porosité de l'ensemble moyenne (fentes de dessiccation, quelques vacuoles et chenaux).

+ 7/10 à 23/25 cm = horizon Ap'2

- limite supérieure nette et légèrement ondulée ;
- texture : argileux ;
- couleur : 5 YR 3/4 (sec) ;
- structure : massive ; à l'état sec, des fentes de dessiccation délimitent de grosses mottes (> 10 cm) polyédriques ; porosité faible, compacité forte ; au sein de l'ensemble massif, ou des grosses mottes, présence de volumes très denses, en forme de boules aplaties ovoïdes de 3-5 cm de long, à périphérie écaillée ; localement, au sommet de l'horizon, structure lamellaire grossière, peu poreuse, très compacte.

+ 23/25 à 30/35 cm = horizon Ap'3

- limite supérieure distincte et régulière ;

TABLEAU I  
Données analytiques du sol non irrigué

Horizons	A %	Lf %	Lg %	Sf %	Sg %	CaCO <sub>3</sub> %	M.O %	N %	C/N	pH eau	E.S mmhos cm	Log 10 Is	pF 4,2	pF 2,5
A1	39.9	19.4	9.6	15.3	15.8	0.5	1.87	0.12	9.0	8.30	0.51	1.26	15.5	26.4
B1	36.3	20.5	12.6	14.7	15.9	0.5	1.44	0.10	8.4	8.45	0.40	1.41	15.8	23.9
B2	46.1	16.9	9.0	11.5	14.6	5.0	0.96	0.08	7.0	8.40	0.77	1.34	19.4	27.2
Bca1	43.2	24.5	6.7	10.5	15.1	18.9	0.31	0.04	4.5	8.65	0.40	1.51	18.0	31.8
Bca2	35.1	34.2	8.2	8.1	12.4	43.5	-	-		8.95	1.36	1.61	18.0	25.7

- texture : très argileux ;
- couleur : 2,5 YR 3/4 (sec) ;
- structure : polyédrique moyenne ; tendance massive ; présence de volumes très denses en forme de boules aplaties ovoïdes ; porosité faible ; compacité forte ; fentes de dessiccation.
- + 30/35 à 50/55 cm = horizon B2
- limite supérieure distincte et régulière ;
- texture : très argileux ;

- couleur : 2,5 YR 3/6 (sec) ;
- structure : prismatique moyenne à sous-structure polyédrique fine ;
- nombreux revêtements organiques sur les faces structurales.
- + > 50/55 cm = horizon Bca identique à celui du profil non irrigué.

Le tableau II résume les principales données analytiques de ce sol.

TABLEAU II  
Données analytiques du sol irrigué

Horizons	A %	Lf %	Lg %	Sf %	Sg %	CaCO <sub>3</sub> %	M.O %	N %	C/N	pH eau	E.S mmhos cm	Log 10 Is	pF 4,2	pF 2,5
Ap1	54.9	19.9	12.2	9.3	4.2	0.1	1.81	0.11	9.5	7.75	1.51	1.67	19.3	26.6
Ap2	54.4	21.4	9.2	8.7	4.1	0.6	1.72	0.11	9.1	7.95	0.64	1.75	19.9	29.0
Ap3	49.2	26.7	12.2	8.9	3.7	0.2	1.50	0.09	9.6	7.90	1.07	1.66	-	-
B2	62.0	18.7	8.8	7.7	3.9	1.1	1.07	0.09	6.8	8.00	1.12	1.48	22.0	37.0
Bca1	53.8	25.3	5.9	5.2	9.8	34.8	0.34	0.05	8.0	8.25	1.00	1.76	21.5	32.3
Bca2	44.1	26.6	5.9	7.9	16.2	40.5	0.19	0.03	3.3	8.40	0.95	1.51	18.6	25.3

### 2.1.3. MORPHOLOGIE COMPARÉE DU SOL NON IRRIGUÉ ET DU SOL IRRIGUÉ

La comparaison morphologique des deux profils de sol, confirmée par de nombreuses autres observations, souligne que le sol irrigué depuis plus de dix ans se

distingue du sol non irrigué par des caractères de couleur, de structure et de porosité.

— Couleur : le sol irrigué s'assombrit à faible profondeur (diminution d'1 ou 2 unités de chroma). Cela concerne l'horizon B1 et le sommet de l'horizon B2, trans-

formés, dans le sol irrigué, en horizons Ap'2 et Ap'3.  
— Structure et porosité : elles sont fortement modifiées par l'irrigation, le fait le plus marquant étant le développement de l'horizon Ap'2, massif, très compact, peu poreux, à volumes ovoïdes très denses. D'une façon générale, dans tous les horizons compris entre 0 et 30/35 cm (sauf dans certains volumes de l'horizon Ap1 où une structure microgrumeleuse s'est développée), l'agrégation devient, dans les sols irrigués, plus grossière, la porosité fine beaucoup plus faible, la compacité beaucoup plus forte, la porosité, dans son ensemble, plus fissurale.

La mise en relation de ces observations morphologiques avec les observations concernant le travail du sol et les modes d'irrigation, permet de dire ceci :

— La profondeur de 30/35 cm, correspondant à la base des principales modifications morphologiques du sol irrigué par rapport au sol non irrigué, est celle de la profondeur du travail du sol effectué avant la première irrigation. Les labours successifs suivants n'iront plus jamais à cette profondeur.

— L'horizon Ap1 du sol irrigué est l'horizon labouré chaque année (plusieurs passages sur sol sec jusqu'à obtenir une structure aussi fine que possible). En culture billonnée, c'est lui, et lui seul, qui est utilisé pour installer les billons et les raies. En culture billonnée, cet horizon est submergé par les irrigations dans les raies, mais il ne l'est pas, ou peu, sur les billons.

— Le sommet de l'horizon Ap'2, à structure lamellaire grossière, est à la fois une semelle de labour et le fond des raies d'irrigation (photos 4 et 5).

— Les horizons Ap'3 et surtout Ap'2 subissent régulièrement de très fortes variations d'humidité : gorgés d'eau au moment de chaque irrigation, ils se dessèchent très fortement entre chaque irrigation. Ce sont des



PHOTO 4. — Profil cultural après culture billonnée : limite très nette entre l'horizon Ap1 à structure polyédrique et grumeleuse et l'horizon Ap'2 massif ; les racines utilisent les fissures pour pénétrer vers l'horizon Ap'3 dont on voit le sommet.

horizons qui ne sont plus jamais labourés (sauf quand on décide de les sous-soler). Ceci explique la prise en masse et le tassement de ces horizons qui, par ailleurs, deviennent plus sombres.



PHOTO 5. — Profil cultural après blé en planche : limite fléchée entre l'horizon Ap1 de 10 cm d'épaisseur et l'horizon Ap'2 à structure continue, découpée par les fentes de dessiccation.

## 2.2. La micromorphologie

### 2.2.1. LE SOL NON IRRIGUÉ

Les principaux caractères micromorphologiques du sol non irrigué (MATHIEU, 1978, 1981) peuvent être résumés de la façon suivante :

#### — *Le plasma*

- Horizon A1 : le plasma est argileux et homogène, sans séparations plasmiques (argillasépique) (BREWER, 1964).

- Horizons B1 et B2 : on distingue un ensemble avec de fines séparations plasmiques striées en îlots (insépique) et quelques agrégats caractérisés par des séparations plasmiques sur les parois des vides, sur la surface des grains du squelette et en zones allongées (ma-skel-vo-insépique).

- Horizons Bca : le plasma reste argileux mais avec d'importantes interflorescences calcaires microcristallines (calcite aciculaire).

#### — *La microstructure* (photos 6 et 8)

- Horizons A1 et B1 : la microstructure (selon BECKMANN et GEYGER, 1967) est spongieuse et grumeleuse avec des vides irréguliers et rugueux.

- Horizons B2 : la microstructure est jointive irrégulière avec de nombreuses fentes, de nombreux chenaux

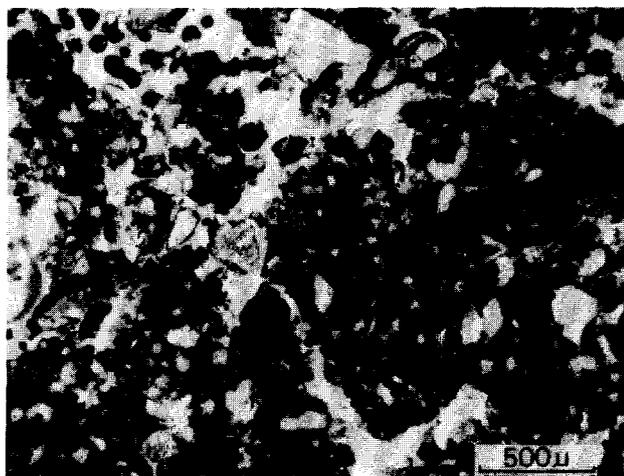


PHOTO 6. — Horizon Ap non irrigué (0-5 cm) avec une microstructure spongieuse à sous-structure cavitaire ; boulettes fécales, chenal de radicelles (lumière naturelle).

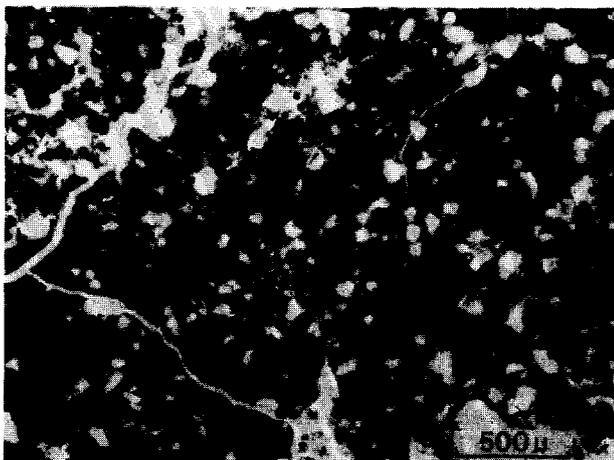


PHOTO 7. — Horizon Ap irrigué (0-5 cm) avec une microstructure cavitaire typique avec fentes désordonnées (lumière naturelle).

et des cavités moins irrégulières ; elle est localement spongieuse ; les pédotubules sont nombreux jusqu'à 50 cm ; il n'y a pas de revêtements d'illuviation sur les faces des agrégats.

• Horizons Bca : la microstructure est principalement jointive et irrégulière avec de nombreuses fentes ; on note quelques calcites aciculaires et des cristaux de sparite.

#### 2.2.2. LE SOL IRRIGUÉ

Par rapport au sol non irrigué, on distingue, dans le sol irrigué, des modifications au sein de l'agrégat pri-

maire (1) et dans la forme et l'arrangement des agrégats (microstructure).

— Dans l'horizon Ap1 : il y a une augmentation du nombre des séparations plasmiques à extinction striées ; les microstructures grumeleuses et spongieuses du sol non irrigué changent en une structure jointive ; le nombre de cavités diminue ; des fentes et des fissures apparaissent (photo 7).

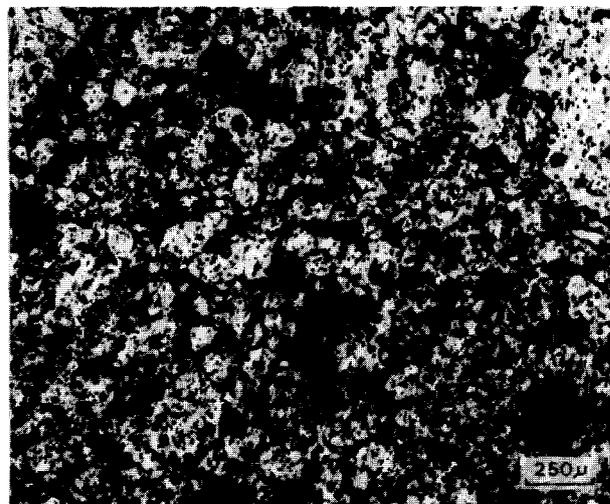


PHOTO 8. — Horizon B1 non irrigué (de 6 à 22 cm) ; microstructure spongieuse à cavitaire (lumière naturelle).

— Dans les horizons Ap'2 et Ap'3 (transformation de l'horizon B1 et du sommet de l'horizon B2 du sol non irrigué), le nombre de séparations plasmiques augmente encore ; l'organisation en réseau de ces séparations montre un net développement de l'assemblage masépique ; on note également la présence de papules ; les structures jointives ont remplacé les structures spongieuses et grumeleuses ; les volumes très denses en formes de boules aplaties ovoïdes (voir macroscopie) ont une microstructure jointive irrégulière sub-parallèle à la partie externe (photo 9).

— Dans les horizons B n'ayant pas été touchés par les labours, on note un assemblage plasmique masépique très net et l'apparition de fins revêtements (argilanes) et de néostrianes ; les fentes restent encore nombreuses ; il y a aussi, par rapport au sol non irrigué, augmentation des calcites aciculaires et des cristaux de sparite.

(1) Agrégat primaire : agrégat le plus simple du matériau pédologique, il ne peut être divisé en agrégats plus petits, mais il peut être arrangé avec d'autres pour former des agrégats composés d'un niveau plus élevé d'organisation (BREWER, 1964).

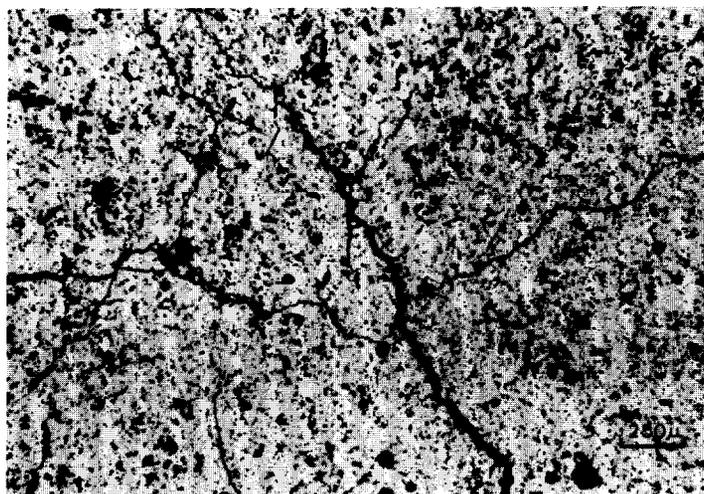


PHOTO 9. — Horizon irrigué Ap'2 (de 5 à 30 cm) ; microstructure cavitaire dense, fissurée (lumière naturelle).

• Dans les horizons Bca, la modification, par rapport au sol non irrigué, de l'assemblage plasmique est identique à celle observée dans l'horizon sus-jacent ; il y a aussi apparition de fins revêtements, de néostrianes et de quelques papules, ainsi que plus de calcite aciculaire et de sparite.

### 2.2.3. MICROMORPHOLOGIE COMPARÉE DU SOL NON IRRIGUÉ ET DU SOL IRRIGUÉ

Comparativement au sol non irrigué, le sol irrigué est caractérisé par trois types principaux de modifications :

— Des modifications se font dans le sens d'une diminution des volumes de l'espace poral, c'est-à-dire un rapprochement des agrégats primaires qui peut aboutir à une coalescence parfaite allant même jusqu'à la disparition des formes initiales de ces agrégats.

— Des modifications touchent également l'assemblage plasmique avec une augmentation et une organisation des séparations plasmiques à extinction striée.

— Des modifications touchent encore le matériau fin argileux (réorganisé en argilanes et papules) et la calcite (calcite aciculaire et sparite plus nombreuses).

Toutes ces modifications traduisent l'action de l'eau et des variations d'humidité : les excès d'eau gonflent et détruisent les agrégats, provoquent des mouvements d'orientation des argiles, entraînent la dispersion et le mouvement des particules fines, amènent des sels ; les dessiccations, souvent extrêmes, provoquent des diminutions de porosités, de nouvelles orientations des argiles (D.E. MC. CORMACK et L.P. WILDING, 1973 ; D. TESSIER et J. BERRIER, 1979), le dépôt des particules fines

(formation des argilanes, redistribuées ensuite en papules par pédoturbation), la précipitation de la calcite amenée par l'eau d'irrigation.

### 2.3. L'espace poral

La méthode d'analyse de l'espace poral est celle proposée par MONNIER *et al.* (1973) en terme de porosité totale ( $n_t$ ), de porosité structurale ( $n_s$ ) et de porosité de l'agrégat élémentaire ( $n_a$ ) (1) (Fig. 2).

La *porosité des agrégats élémentaires* ( $n_a$ ) (« porosité texturale » de MONNIER *et al.* 1973) dépend essentiellement de la taille, de la forme et de l'arrangement relatif des particules élémentaires du sol (argile, limon, sable, particules organiques). Les vides plus grands qui existent entre les agrégats élémentaires ( $n_j^c$ ) et entre les mottes ( $n_j^m$ ) (plusieurs agrégats élémentaires constituent une motte) constituent la *porosité structurale* ( $n_s$ ). La porosité structurale ne peut être mesurée qu'indirectement par relation entre la *porosité totale* ( $n_t$ ), la *porosité des mottes* ( $n_c$ ) et la porosité des agrégats élémentaires ( $n_a$ ). La somme de tous les vides constitue la *porosité totale* ( $n_t$ ).

Les mesures commentées ci-dessus ont été faites sur des échantillons prélevés en sol relativement sec, à la fin de la période culturale.

#### 2.3.1. DANS LES SOLS NON IRRIGUÉS

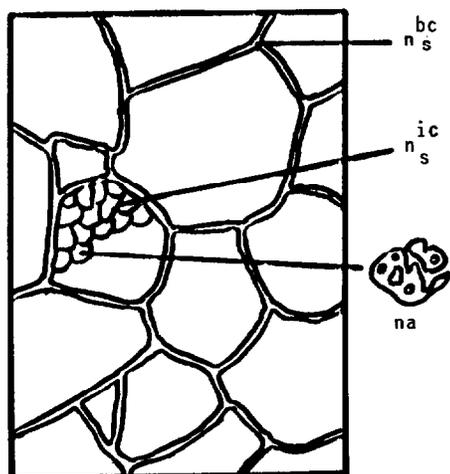
Il y a une diminution graduelle de la porosité de la surface vers la profondeur (Tabl. III) :

la porosité totale passe de 50 à 43,1 % = - 6,9 %

la porosité de la motte passe de 40,4 à 35,5 % = - 4,8 %

la porosité de l'agrégat passe de 33,8 à 29,5 = - 3,6 %

(1) Agrégat élémentaire : agrégat tamisé entre 2 et 3 mm et permettant d'estimer valablement la valeur minimale de la porosité de l'agrégat qui correspond à l'arrangement le plus serré possible du matériau (FIES *et al.*, 1972).



- . nt : porosité totale (mesure directe)
- . nc : porosité des agrégats (mesure directe)
- . na : porosité des micro-agrégats (agrégats élémentaires) ≠ porosité texturale (mesure directe)
- . n<sub>s</sub><sup>ic</sup> : porosité structurale séparant les micro-agrégats (mesure déduite de nc et na)
- . n<sub>s</sub><sup>bc</sup> : porosité structurale séparant les agrégats (mesure déduite de nt et nc)
- . ns : porosité structurale totale (mesure déduite de nt et na)

$$\begin{aligned}
 . ns &= n_s^{bc} + n_s^{ic} & . nt &= nc + n_s^{bc} \\
 . nc &= na + n_s^{ic} & &= ns + na
 \end{aligned}$$

FIG. 2. — Les différents niveaux de porosité

La diminution de la porosité des mottes (nc) en fonction de la profondeur est le résultat à la fois de la baisse de porosité de l'agrégat élémentaire (na) et d'une plus grande coalescence de ces agrégats (baisse de n<sub>s</sub><sup>ic</sup>: tableau IV). La porosité entre les mottes (n<sub>s</sub><sup>bc</sup>) ne se modifie pas, ou peu, en fonction de la profondeur.

### 2.3.2. DANS LES SOLS IRRIGUÉS

a) *Au niveau de l'agrégat élémentaire (na)* : les principales modifications, par rapport aux sols non irrigués, sont les suivantes :

- diminution significative de la porosité jusqu'à 45 cm de profondeur, sous toutes les cultures ;
- cette diminution est, dans les horizons de surface (de 0 à 25 cm), plus forte sous luzerne de 4 ans que sous blé et betterave sucrière.

b) *Au niveau de la motte (nc)* : les principales modifications, par rapport aux sols non irrigués, sont les suivantes :

- en terme de porosité moyenne, diminution marquée entre 15 et 35 cm ; cette diminution n'est due qu'à la baisse de porosité des agrégats élémentaires (n<sub>s</sub><sup>ic</sup> ne bouge pas) ;
- la porosité entre les agrégats élémentaires (n<sub>s</sub><sup>ic</sup>) augmente fortement de 0 à 15 cm et de 35 à 45 cm ; au niveau de la motte il y a donc compensation entre la baisse de n<sub>a</sub> et l'augmentation de n<sub>s</sub><sup>ic</sup> ;
- c'est sous luzerne, entre 0 et 25 cm, que n<sub>c</sub> diminue le plus, cette diminution étant due à la baisse conjointe de n<sub>a</sub> et de n<sub>s</sub><sup>ic</sup>.

c) *Au niveau de l'horizon (nt)* : les principales modi-

fications, par rapport aux sols non irrigués, sont les suivantes :

- dans les horizons de surface (0 - 15 cm), la porosité totale est, en moyenne, significativement plus élevée dans les sols irrigués que dans les sols non irrigués ;
- cette augmentation n'est cependant vraie que dans le cas des cultures annuelles ; sous luzerne, il y a diminution ;
- en dessous de 15 cm de profondeur, la porosité totale des sols irrigués n'est pas différente à celle des sols non-irrigués ;
- dans tous les cas, la porosité entre les mottes (n<sub>s</sub><sup>bc</sup>) augmente dans les horizons de surface (0 à 25 cm) ; cette augmentation est particulièrement importante de 0 à 15 cm et elle est plus forte sous culture annuelle que sous luzerne.

Au total, il faut retenir que :

- la diminution de porosité, liée à l'irrigation, concerne essentiellement la microporosité c'est-à-dire celle des agrégats élémentaires : c'est la porosité liée à l'arrangement des particules qui est modifiée, diminuée ;
- cette diminution est, selon les cas, partiellement ou totalement compensée par l'augmentation de la macroporosité d'arrangement des agrégats et des mottes ; dans certains horizons, l'augmentation de la macroporosité est plus forte que la diminution de la microporosité ;
- sous culture annuelle, les horizons Ap'2 et Ap'3 sont les plus marquées par la baisse de porosité : micro et macroporosité diminuent conjointement ; sous luzerne, la diminution maximum de porosité concerne les 15 premiers cm de sol.

TABLEAU III

Moyennes de la porosité totale ( $n_t$ ), de la porosité mottière ( $n_c$ ) et de la porosité de l'agrégat élémentaire ( $n_a$ ) de sols non irrigués et de sols irrigués depuis 13 ans dans les plaines de la Moulouya (% , v/v)  
(Prélèvements sur matériaux relativement secs à la fin de la période culturale)

TYPE DE POROSITE	PROFONDEUR (cm)	SOLS NON IRRIGUES		SOLS IRRIGUES						
		hori-zons	porosité %	hori-zons	porosité moyenne		porosité % au terme de			analyses statistiques (2)
					%	analyses statistiques (1)	4 années de luzerne	1 année de blé	1 année de bet-terrave sucrière (billon)	
TOTAL $n_t$	0-5	A 1	50.0	Ap 1	56.0	**	46.4	53.8	60.2	***
	5-15	B 1	49.6	Ap 1	53.0	*	45.0	53.8	55.3	***
	15-25	B 1	48.6	Ap' 2	47.0	n.s.	46.1	47.0	47.3	n.s.
	25-35	B 2	49.3	Ap' 3	47.2	n.s.	-	-	-	-
	35-45	B 2	46.8	B 2	48.2	n.s.	-	-	-	-
	45-65	Bca	45.4	Bca	47.0	n.s.	-	-	-	-
MOTTES $n_c$	0-5	A 1	40.4	Ap 1	39.6	n.s.	33.3	39.4	42.1	***
	5-15	B 1	39.7	Ap 1	38.7	n.s.	31.9	40.2	41.0	***
	15-25	B 1	39.5	Ap' 2	35.5	**	35.4	33.5	35.9	n.s.
	25-35	B 2	38.5	Ap' 3	36.3	*	37.2	33.7	36.1	n.s.
	35-45	B 2	37.2	B 2	37.8	n.s.	37.9	35.0	38.6	n.s.
	45-65	Bca	37.4	Bca	38.4	n.s.	-	-	-	-
AGREGATS $n_a$	0-5	A 1	33.8	Ap 1	29.2	***	27.0	31.5	29.3	**
	5-15	B 1	33.2	Ap 1	28.9	***	26.9	30.3	29.3	*
	15-25	B 1	33.7	Ap' 2	28.8	***	27.9	29.6	28.9	n.s.
	25-35	B 2	32.8	Ap' 3	29.6	***	30.2	30.8	29.1	n.s.
	35-45	B 2	33.2	B 2	30.5	***	30.2	30.9	30.5	n.s.
	45-65	Bca	31.3	Bca	31.2	n.s.	-	-	-	-

Analyses statistiques : (1) entre les sols non irrigués et irrigués ; (2) entre les trois sols irrigués.

\*\*\* = différence très hautement significative, risque d'erreur 1‰.

\*\* = différence hautement significative, risque d'erreur 1 %

\* = différence significative, risque d'erreur 5 %

n.s. = différence non significative

#### 2.4. La susceptibilité au tassement

En utilisant la méthode PROCTOR pour étudier le comportement au tassement des sols argileux non irrigués des Triffa, (MATHIEU, 1983), on observe le début du tassement à l'énergie PROCTOR à des teneurs en eau de 10 à 13 %. Or, on sait que ces teneurs sont fréquentes dans les sols irrigués au moment des labours, non pas dans la couche labourée, mais entre 15 et 25 cm de profondeur. Au même moment, la couche labourée a très souvent des teneurs en eau inférieures à 10 %, c'est-à-dire inférieures au seuil de sensibilité  $W_c$  défini par le test.

Un point fondamental mis en évidence par ce test concerne le compactage de l'agrégat élémentaire de ces sols. Ce dernier commence à être compacté à une valeur de l'humidité avoisinant 15 %. Or, cette valeur correspond à une teneur en eau encore fréquente entre 15 et 35 cm de profondeur au moment des labours des sols irrigués.

Enfin, le test appliqué à des agrégats de sols irrigués depuis plusieurs années montre que l'énergie PROCTOR, à des teneurs en eau croissante de  $W_c$  à  $W_m$  (15 à 22,5 %), ne modifie plus l'arrangement interne des agrégats, mais seulement l'arrangement entre les agrégats.

TABLEAU IV  
Porosité structurale dans les mottes ( $n_s^{ic}$ ) et entre les mottes ( $n_s^{bc}$ ) (% v/v)

	PROFONDEUR (cm)	SOLS NON IRRIGUES (%)	SOLS IRRIGUES			
			Moyenne (%)	Luzerne (%)	Blé (%)	Betterave à sucre (%)
$n_s^{ic}$	0-5	9.9	14.7	8.6	11.5	18.1
	5-15	9.7	13.8	6.9	14.3	16.5
	15-25	8.8	9.4	10.4	5.6	9.8
	25-35	8.5	9.5	10.0	7.1	9.9
	35-45	5.9	10.6	11.1	5.8	11.7
$n_s^{bc}$	0-5	16.3	27.1	19.7	23.8	31.3
	5-15	16.4	23.3	19.2	22.7	24.3
	15-25	15.1	17.9	16.6	21.2	17.7
	25-35	17.5	17.1	14.4	16.6	18.1
	35-45	15.4	16.6	15.8	14.3	17.4

Ces données complètent bien celles obtenues sur l'espace poral et suggèrent le rôle joué par un travail du sol en condition trop humide sur le tassement des agrégats élémentaires des horizons Ap'2 et Ap'3. Rappelons cependant que les agrégats élémentaires sont également nettement moins poreux dans les horizons Ap1 du sol irrigué que dans les horizons A1 et B1 du sol non irrigué : or nous avons vu que les horizons Ap1 sont, en général, labourés en conditions trop sèches pour qu'intervienne un tassement mécanique. Le tassement hydrique (GRIMALDI, 1981), résultat d'un dessèchement excessif, joue donc certainement également un rôle important dans la baisse de porosité des agrégats élémentaires des sols irrigués.

### 2.5. La stabilité structurale

La stabilité structurale a été mesurée selon la méthode HENIN *et al.* (1969).

On a comparé, sur une même parcelle, les indices Is et K avant et après 13 années d'irrigation (Tabl. V).

Les deux indices montrent une très nette amélioration de la stabilité structurale après irrigation.

On doit rapprocher cette amélioration de la stabilité structurale du compactage : les agrégats compactés par le travail du sol et par l'irrigation seraient plus stables, selon les tests HENIN, que les agrégats non compactés. Il y a là matière à réflexion sur l'interprétation en terme de fertilité d'une amélioration de la stabilité structurale : dans le cas des sols irrigués l'augmentation de la stabilité structurale paraît synonyme de compaction ce qui n'a rien de réjouissant.

### 2.6. Conclusions

La comparaison de deux sols au départ semblables, l'un non irrigué, l'autre irrigué depuis 13 ans, souligne

donc de grandes différences : la morphologie du sol a été fortement modifiée par l'irrigation sur ses 50 premiers cm d'épaisseur.

Résumons l'essentiel :

A. L'ensemble du système poreux est modifié, le fait le plus marquant étant la forte diminution de la porosité de l'agrégat élémentaire, accompagné d'une augmentation importante, à toutes les échelles, de la porosité fissurale. Les observations microscopiques, l'étude des porosités et des structures dans les divers horizons en fonction des types de culture et d'irrigation, les mesures PROCTOR, tout ceci indique que ces modifications du système structural et poreux sont principalement liées aux variations excessives d'humidité, auxquelles s'ajoutent, pour les horizons situés au-dessous de 10 cm, le compactage mécanique. Les excès d'eaux détruisent les mottes, voire certains agrégats élémentaires ; les dessiccations extrêmes compactent les agrégats élémentaires et en modifient les microorganisations (argilocompaction, assemblages masépiques et bimasépiques), fabriquent de nouveaux agrégats et de nouvelles mottes moins poreux et plus cohérents, créent des porosités fissurales, micro et macro ; certains labours, effectués sur des horizons trop humides, contribuent à leur tassement (principalement les horizons Ap'2 et Ap'3 situés entre 15 et 35 cm de profondeur).

B. Les modifications de couleur, de structure et de porosité, permettent de distinguer, dans le profil cultural irrigué, trois types d'horizons, dont deux sont totalement différents de ceux du profil cultural non irrigué : — Des horizons de surface qui ont comme caractères communs d'être régulièrement travaillés (entre 10 et

TABLEAU V

Variations de la stabilité structurale après 13 ans d'irrigation gravitaire (station expérimentale de Slimania, plaine des Triffa)

Horizons cm	Indice d'instabilité structurale Is			Indice de percolation K		
	1964	1977	Analyse statist.	1964	1977	Analyse statist.
0-5	5,3	3,1	***	6,5	11,6	***
5-15	5,8	3,3	***	5,5	8,7	***
15-25	5,3	3,6	***	6,0	6,8	*
25-35	5,0	3,8	***	6,7	7,1	

15 cm de profondeur), puis submergés. Ces horizons subissent ainsi constamment des modifications de structure et de porosité en fonction du mode d'utilisation du moment (types et durées des cultures, des irrigations, du travail du sol). Ces horizons sont appelés Ap1.

— Des horizons sous-jacents au niveau de travail actuel, ayant comme caractères communs : une structure continue et plus compacte qu'en surface, une porosité plus faible des agrégats élémentaires et des mottes, un assombrissement fréquent de la couleur, une diminution de l'activité biologique. Ils ont généralement 20 à 25 cm d'épaisseur et ont presque toujours été labourés lors du début de la période d'irrigation, puis plus jamais. Ils connaissent de fortes variations d'humidité liées aux irrigations. Ces horizons sont appelés Ap'2 et Ap'3.

— Des horizons situés en dessous des horizons précédents et ayant conservé l'essentiel des caractères morphologiques des sols non irrigués. On y observe cependant des modifications, macroscopiques et surtout microscopiques, qui y témoignent de phénomènes de transfert de matière (particules argileuses, produits organiques, sels) et de variations excessives d'humidité (assemblage masépique, fissuration).

### 3. VUE D'ENSEMBLE DES MODIFICATIONS STRUCTURALES APPORTÉES PAR L'AGRICULTURE IRRIGUÉE AUX SOLS DE LA BASSE MOULOUYA

Dans le paragraphe précédent, un exemple de sol modifié par l'irrigation a été présenté. Cet exemple est représentatif, mais les modifications apportées aux sols de la Basse-Moulouya par l'agriculture irriguée peuvent prendre d'autres aspects que nous voulons maintenant brièvement résumer.

Les types de modifications observées sont, principalement, fonction de trois facteurs :

- le nombre d'années d'agriculture irriguée ;
- les types de culture et de préparation des sols ;
- les types de sols.

#### 3.1. L'évolution des sols en fonction du nombre d'années d'irrigation

Entre la première irrigation et les treize années d'irrigation dont nous venons de présenter les conséquences, l'analyse des étapes intermédiaires apporte quelques réponses en ce qui concerne la vitesse d'apparition des nouveaux caractères d'organisation des sols irrigués. Certains caractères apparaissent en effet très vite, après quelques périodes d'irrigation, d'autres moins vite.

L'exemple suivant concerne un sol du même type que celui étudié dans le paragraphe précédent, dans la plaine des Triffa.

Le sol a été défriché au *ripper* et au *root plow*, puis plané au pulvérisateur à disque et à la nivelieuse. La macrostructure est déjà nettement modifiée par ces travaux : la structure de surface est rendue grenue et farineuse et celle des horizons B est complètement fragmentée.

Après un an, trois ans et huit ans d'irrigation, on observe ceci (Tabl. VI) :

A. Après les toutes premières irrigations, de la première année de culture irriguée, il y a déjà deux types de modification de la structure en surface (culture en billons) :

- la formation d'une croûte de battance dans la raie d'irrigation ; cette croûte à quelques millimètres d'épaisseur ; les éléments texturaux sont triés et lités, les plus fins en surface, les grossiers à la base de la croûte ;
- la formation, dans l'horizon Ap, d'une macrostructure à tendance continue : il y a cimentation des agrégats entre eux ; la microstructure spongieuse dans des

TABLEAU VI

Variations de la moyenne des porosités des sols irrigués par rapport à la moyenne des mêmes porosités des sols non irrigués (% , v/v)

Profondeur cm	Sols argileux non calcaires en surface								Sols Calcaires après 20 ans
	Cultures assolées						Agrumes		
	raies et billons		après 13 ans				Cuvette	entre 2 arbres	
	après 3 ans	après 8 ans	raies et billons		planches				
(*)			(**)	1 an	4 ans				
<b>AGREGAT ELEMENTAIRE</b>									
0- 5	- 2,2	- 3,2	- 2,2	- 4,5	- 2,3	- 6,8	- 2,9	- 6,1	- 1,4
5-15	- 1,7	- 3,1	- 3,3	- 4,1	- 1,9	- 6,3			
15-25	.	- 2,1	- 3,3	- 4,9 (1) - 9,4 (2)			- 1,1	- 2,4	- 2,2
25-35	.	- 2,8	.	- 3,3 (1) - 7,8 (2)			.	- 1,5	.
35-45	.	.	- 2,4	- 2,7			- 3,2	- 3,2	- 1,6
<b>MOTTE</b>									
0- 5	- 2,6	- 1,0	- 2,5	+ 1,7	+ 1,0	- 7,1	+ 1,0	- 2,3	- 2,5
5-15	.	.	.	+ 1,3	.	- 7,8			
15-25	+ 1,4	.	- 4,8	- 4,0 (1) - 8,8 (2)			+ 1,2	.	- 3,6
25-35	+ 1,0	.	.	- 2,2 (1) - 7,8 (2)			+ 1,0	+ 1,6	- 3,2
35-45	+ 3,1	+ 2,8	+ 2,6	-----			.	.	- 3,5
<b>HORIZON</b>									
0- 5	+ 9,0	+ 8,7	+12,3	+10,2	+ 3,8	- 3,6	+ 1,4	.	.
5-15	+ 7,4	+ 7,1	+ 7,4	+ 5,7	+ 4,2	- 4,6			
15-25	+ 1,3	- 1,2	+ 3,5	- 1,3	- 1,7	- 2,5	- 1,4	- 1,3	-11,1
25-35	.	- 1,9	.	- 2,1			- 1,8	- 1,6	- 6,2
35-45	.	+ 1,1	+ 6,1	+ 1,4			.	.	- 4,1

(\*) : avec sous-solages réguliers et labours profonds fréquents

(\*\*) : sans sous-solages ni labours profonds

(1) : dans la structure continue

(2) : dans les agrégats ellipsoïdaux

sols non irrigués prend ici une tendance *cavitaire* due à une plus grande coalescence des agrégats primaires après les premières irrigations.

B. Après trois ans de culture irriguée, le profil cultural présente déjà un nombre important de caractères modifiés par rapport au sol non irrigué.

— A l'échelle de la macrostructure : une différenciation apparaît dans l'horizon Ap initial qui se divise en horizon Ap1 et horizon Ap'2 suite à la diminution de la profondeur des labours :

- *horizon Ap1* : c'est le niveau des labours actuels ; en fin de culture, il présente une structure grenue prise en masse ; la porosité structurale entre les mottes (n<sup>bc</sup>) augmente de 8 à 10 % par rapport au sol non irrigué ;
- *horizon Ap'2* : la tendance continue de la structure s'affirme (structure continue cimentée) ; les larges fentes de dessiccation sont fréquentes ;
- dans les *horizons B*, malgré le défrichement préalable, la macrostructure a de nouveau une tendance continue juste en dessous de l'horizon Ap'2 ; du matériau limono-organique éluvié recouvre des faces des agrégats et des mottes.

— A l'échelle de la microstructure : dans les horizons Ap (0-35 cm), la porosité de l'agrégat élémentaire montre une nette diminution par rapport à celle du sol non irrigué (— 6 %) ; il y a donc déjà tassement à ce niveau d'organisation.

C. Après huit ans de culture irriguée, les modifications structurales augmentent encore :

— A l'échelle de la macrostructure :

- à la récolte, la structure de l'horizon Ap1 est constitué d'agrégats grenus, grumeleux et de mottes, le tout pris en masse ;
- dans l'horizon Ap'2, la structure continue s'accroît (structure continue fondue) ; il y a de nombreuses fentes ;
- il y a formation d'agrégats ellipsoïdaux dans les horizons Ap ;
- la partie de l'horizon B sous-jacent à l'horizon Ap'2 acquiert une structure continue et on y observe quelques agrégats ellipsoïdaux : c'est une première ébauche de l'horizon Ap'3 ;
- des infiltrations de matériau limono-organique de surface, sous forme de revêtements, sont importantes dans tout l'horizon B.

— A l'échelle de la microstructure :

- entre 0 et 35 cm, la porosité de l'agrégat élémentaire a encore diminué par rapport au cas de 3 ans (— 3 %), alors que la porosité totale est toujours supérieure à celle du sol non irrigué de 0 à 15 cm ; il y a donc accentuation du tassement de l'agrégat élémentaire ;

- dans l'horizon Ap1, l'assemblage plasmique présente un nombre plus important de séparations plasmiques en îlots (insépique) ;
- dans l'horizon Ap'2, la microstructure est nettement modifiée : les éléments deviennent anguleux et le nombre de vides diminue fortement ; quelques néostrianes apparaissent.

Au-delà de 35 cm de profondeur, c'est-à-dire dans l'horizon B non touché par les labours, les transformations à l'échelle de l'agrégat primaire (assemblage du matériau fin, traits micropédologiques), n'apparaîtront qu'après plus d'années d'irrigation, soit entre 8 et 15 ans de culture irriguée.

En résumé, on observe donc des modifications importantes et intenses en surface, dans un *temps court* : après 3 ans d'irrigation, il y a déjà tassement de l'agrégat élémentaire et les effets du défrichement sur la macroporosité sont déjà annulés ; après 8 ans d'irrigation, le tassement de l'agrégat élémentaire s'est accentué, l'espace poral cavitaire est largement remplacé par un espace poral de fentes, l'assemblage plasmique présente un nombre plus important de séparations en îlots. Le tassement de l'agrégat élémentaire, dans le volume labouré et dans l'horizon sous-jacent au labour, s'accroît progressivement depuis le début de la période d'irrigation.

### 3.2. L'évolution des sols en fonction des types de culture et de préparation des sols

Dans le paragraphe 2, en décrivant l'espace poral, il a déjà été montré que l'évolution des sols n'était pas la même selon les types de culture donc selon les modalités de l'irrigation. Nous allons maintenant étudier quelques exemples qui permettent de mieux comprendre le rôle spécifique de certains travaux du sol, de certaines cultures et de certains modes d'irrigation.

#### 3.2.1. LES LUZERNIÈRES

La luzerne est toujours cultivée en planches fermées donc irriguée par submersion. En assolement, la luzerne est laissée 4 ans, au cours desquels aucun travail du sol n'est effectué. La luzerne peut également être cultivée en monoculture : on connaît des luzernières de 40 ans, la culture ayant été ressemée tous les 6-7 ans.

Lors de l'installation d'une luzernière, les labours sont généralement profonds et concernent les horizons Ap1 et Ap'2 des sols irrigués, si bien qu'après 4 ans de culture de luzerne, la succession des horizons est la suivante : Ap1 (0 à 15-20 cm), Ap'3 (15-20 à 30-35 cm) et B2 (30-35 à 50-55 cm). Par rapport aux sols sous cultures annuelles irriguées, les principales originalités morphologiques des sols après plusieurs années de luzerne irriguée sont les suivantes (voir Tabl. VI) :

- Dans l'horizon Ap1, de 0 à 15-20 cm :
  - dans les 5 premiers cm (Ap11) une macrostructure lamellaire bien développée (photo 10) ;
  - en dessous, (Ap12) une macrostructure continue, découpée en blocs décimétriques par le jeu de très

- larges fentes de dessiccation ;
  - souvent, des agrégats en boules se développent dans cette macrostructure continue ;
  - l'ensemble est toujours extrêmement dur, compact, cimenté, à l'état sec.

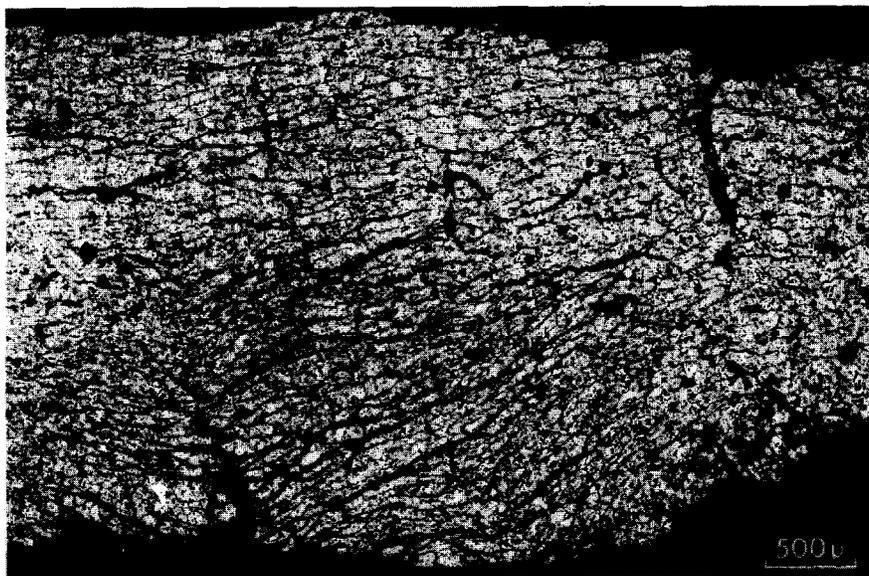


PHOTO 10. — Microstructure lamellaire typique en surface après 4 années en planches fermées de luzernières (lumière naturelle).

— Dans les très vieilles luzernières en monoculture, l'horizon sous le labour (Ap'3) présente une structure lamellaire grossière dans laquelle la densité mottière est la plus élevée de tous les sols irrigués (densité de la motte = 1,9).

— L'agrégat élémentaire présente les valeurs minimales de sa porosité de 0 à 15 cm (en assolement) (27 %) et de 20 à 30 cm (en monoculture) (25,2 %).

— La microstructure planaire se développe en surface dans la macrostructure lamellaire.

— Les microstructures polyédriques, cavitaires et souvent massives, se développent dans la macrostructure continue des horizons transformés.

— En surface, l'assemblage plasmique présente un développement important et très prononcé en îlots (insépiques) pouvant s'organiser en mosaïque (mosépique).

Dans les luzernières, les racines sont puissantes. Mais si elles pénètrent profondément, elles sont cependant caractérisées par deux aspects particuliers :

- elles présentent peu de ramifications ;
- elles ont un parcours extrêmement sinueux et elles sont liées aux fentes de dessiccation.

Ces transformations particulièrement fortes indiquent que dans les luzernières, irriguées par submersion pendant plusieurs années, le compactage hydrique est

extrême. L'excès d'eau répété, lié aux submersions, détruit partiellement les agrégats ; puis les dessiccations successives provoquent la très forte diminution de l'espace poral du matériau sursaturé. L'effet cumulatif de ces désagrégations et de ces dessiccations durant une longue période sans travail du sol se manifeste aussi par le nombre élevé et la taille des fentes de dessiccation ainsi que par la création d'une structure continue typique, extrêmement compacte et cimentée.

### 3.2.2. LES PARCELLES SOUS-SOLÉES ET LABOURÉES PROFONDÉMENT

L'étude d'une parcelle ayant subi un défrichement profond au *ripper* avant la mise en irrigation, irriguée pendant 7 ans sans travail profond du sol, puis sous-solée 4 fois à 65 cm et labourée 6 fois à 25 cm en l'espace de 5 ans, montre que l'évolution du sol sous ce type d'exploitation diffère nettement de celle rencontrée sur les sols irrigués sans travaux particuliers.

Cette évolution est caractérisée par (voir Tabl. VI et VII) :

- Une assez faible diminution de la porosité de l'agrégat élémentaire, entre 5 et 20 cm de profondeur, par rapport à celle des sols non irrigués ; cette diminution est plus faible que dans les sols non sous-solés et irrigués depuis 13 ans. Dans les autres niveaux, il y a peu de

changement, en particulier dans les horizons sous-solés, sous le niveau de labour (alors que dans les sols irrigués non sous-solés la porosité de l'agrégat élémentaire y est fortement diminuée jusqu'à 45 cm de profondeur) (Tabl. VII).

— Une augmentation très nette de la porosité structurale hors de la motte.

— L'absence d'un niveau compact sous le fond de labour et de formation d'agrégats ellipsoïdaux.

— Le maintien de l'augmentation de la porosité structurale hors motte dans les horizons sous-solés de 35 à 65 cm de profondeur, tandis que dans l'horizon juste

sous le fond de labour (25-35 cm) cette augmentation disparaît.

— Le maintien d'une porosité importante dans les agrégats primaires (observation microscopique) qui confirme les mesures faites sur les agrégats élémentaires. Comme nous savons qu'après 7 années d'irrigation normale, la porosité des agrégats élémentaires et primaires a déjà fortement diminuée (voir paragraphe 3.1), il faut imaginer que le sous-solage, peut-être par le canal d'une réactivation de l'activité biologique, a permis à ces agrégats de retrouver une partie de leur porosité avant irrigation.

TABLEAU VII

Comparaison du volume de l'espace poral en parcelles sous-solées et autres (% v/v).

Prof. cm	Por. totales				Por. mottes				Por. agrégat			
	1	2	4	3	1	2	4	3	1	2	4	3
0 - 5	50,0	62,3	***	56,0	40,4	37,9	n.s.	39,6	33,8	31,5	n.s.	29,1
5 - 15	49,6	57,0	***	53,0	39,7	40,5	n.s.	38,7	33,2	29,9	**	28,9
15 - 25	48,6	52,1	***	47,0	39,5	34,7	*	35,5	33,7	29,3	**	28,8
25 - 35	49,3	50,0	n.s.	47,2	38,5	39,2	n.s.	36,3	32,8	32,4	n.s.	29,6
35 - 45	46,8	52,9	***	48,2	37,2	39,8	*	37,8	33,2	32,0	n.s.	30,5
45 - 65	45,4	51,0	***	47,0	37,4	37,7	n.s.	38,4	31,3	30,5	n.s.	31,2

1 - sols non irrigués (tableau 3)

2 - parcelle sous-solés

3 - sols irrigués depuis 13 ans (tableau 3)

4 - interprétation statistique entre 1 et 2

— Le développement de l'assemblage plasmique se poursuit selon le schéma décrit dans les autres sols.

Sur le sol irrigué depuis 13 ans, non sous-solé et labouré régulièrement à 10-15 cm de profondeur (étudié au paragraphe 2), nous avons testé l'hypothèse selon laquelle le sous-solage a une incidence directe sur le rendement des cultures irriguées, par la suppression de l'horizon compact en dessous du niveau de labour et par l'amélioration générale de la structure. Le dispositif expérimental en blocs randomisés à 2 traitements, 6 répétitions et 3 dates de récolte a concerné la culture de la betterave sucrière. L'écart des rendements de racines a été de 10,1 T/ha à la 2<sup>e</sup> récolte et de 7,4 T/ha à la 3<sup>e</sup> récolte entre les traitements sous-solés et les

traitements non sous-solés (rendement moyen de l'essai pour les 3 dates de récolte : 60 T/ha).

### 3.2.3. LES PLANTATIONS D'AGRUMES

Dans la plaine des Triffa, de nombreuses plantations d'agrumes ont été installées sur sol défoncé à la charrue-balance. Mais dans d'autres plantations, surtout dans les lotissements et dans les petites propriétés, l'installation a été réalisée par la méthode du simple trou de plantation pour chaque arbre. La comparaison de ces deux modes de plantation, en utilisant comme référence l'évolution des profils culturaux et des profils racinaires, apporte les remarques essentielles suivantes (MATHIEU et HARRATI, 1980) (voir Tabl. VI et VIII) :

a) Par rapport aux autres sols irrigués, les sols sous agrumes présentent, quel que soit le mode de plantation des arbres, les caractéristiques originales suivantes : — Le caractère le plus marqué est certainement l'activité biologique, estimée par l'étude des profils racinaires et par les traces de l'activité faunique (chenaux de vers de terre, grumeaux coprogènes) : les sols sous agrumes présentent une activité biologique plus importante que celle de tous les autres sols irrigués. Les sols défoncés à la charrue-balance présentent une activité plus grande et à plus grande profondeur que ceux en « trou de plantation ».

— Un autre caractère important est l'augmentation très nette de la teneur en matière organique dans l'horizon de surface par rapport aux sols non irrigués. Dans les sols non irrigués, les teneurs de 2 à 3,2 % sont limitées aux 5 premiers cm. Dans les plantations d'agrumes, ces teneurs sont celles relevées dans les 15 premiers cm du sol (dans les sols irrigués sous culture annuelle, on note également une augmentation des teneurs en matière organique dans les 10-15 premiers cm du sol, mais cette augmentation est beaucoup plus légère : 0,1 à 0,2 %). — A l'échelle de l'espace poral dans les horizons supérieurs (0-25 cm), deux faits sont à souligner (Tabl. VIII) :

TABLEAU VIII

Volume de l'espace poral sous agrumes comparé aux sols non irrigués ou irrigués depuis 13 ans (cultures annuelles et luzerne en assolement (%), v/v)

	sous l'arbre	entre deux arbres	non irrigué	irrigué depuis 13 ans (tableau 3)
agrégat	31,6	28,4	33,6	29,0
motte	41,0	37,7	40,0	39,1

- Le premier fait concerne la différence très nette, de 0 à 15 cm de profondeur, entre les organisations les plus fines (motte et agrégat) du dessous de l'arbre (la cuvette) et de l'entre-deux arbres, comparées entre elles, mais également avec celles des sols non irrigués : on retiendra que sous les arbres le tassement est faible au niveau de l'agrégat élémentaire et nul au niveau de la motte.

- Le second fait concerne la composition de l'espace poral sous plantations d'agrumes et dans les sols irrigués depuis 13 ans (assolement cultures annuelles et luzerne : voir paragraphe 2 : il est clair que si c'est sous les arbres que l'espace poral subit les plus faibles diminutions, c'est entre les arbres que l'on

constate, au niveau des agrégats et des mottes, les plus forts tassements ; il y a probablement là le résultat de la conjonction du tassement hydrique et du tassement mécanique (passage répété entre les arbres des tracteurs et des outils pour faucher l'herbe, pour les traitements phytosanitaires, pour le ramassage des fruits,...).

b) Si on compare maintenant les deux modes de plantation des agrumes :

— Le caractère le plus visible est la limite des défoncements. Cette limite est dessinée par la différence de couleur entre les horizons retournés et disloqués (brun rouge foncé jusqu'à 60 cm) et les autres horizons rouge foncé.

— Les profils racinaires sont très différents et traduisent l'importance de l'ameublissement du sol par le défoncement avant la plantation :

- dans les sols défoncés, il y a 645 racines/m<sup>2</sup> de profil vertical, avec un développement maximum entre 20 et 40 cm ;

- dans les sols trou de plantation, il n'y a que 357 racines/m<sup>2</sup> de profil vertical, avec un développement maximum entre 10 et 30 cm.

Notons que c'est sous plantations d'agrumes que nous avons pu, dans la plaine des Triffa, étudier les sols les plus anciennement irrigués. Nous avons pu en particulier noter que dans des sols irrigués depuis 35 ans (sols argileux identiques à ceux étudiés dans les paragraphes 2 et 3) le développement des assemblages plasmiques masépiques et des néostrianes était nettement plus marqué que dans les sols irrigués depuis 13 ans.

### 3.3. Le cas des sols calcaires dès la surface

Toutes les situations présentées jusqu'à présent, dans les paragraphes 2 et 3, concernent des sols non calcaires et argileux dans leurs 50 premiers cm. Mais il y a aussi, en Basse-Moulouya, des surfaces importantes de sols irrigués qui sont à la fois, dans leurs horizons supérieurs, calcaires (jusqu'à 20-25 %) et moins argileux (20 à 30 % au lieu des 40 à 50 % des sols argileux non calcaires).

Le profil cultural d'un sol calcaire irrigué depuis une vingtaine d'années (assolement de cultures annuelles et de luzerne) n'est guère, macroscopiquement, très différent de celui d'un sol argileux non calcaire. Cependant, quand on y regarde de près, on constate que les transformations structurales sont significativement différentes (voir tableau VI) :

A. A l'échelle de l'agrégat élémentaire, l'espace poral est peu modifié : le tassement est faible.

B. Pour ce qui est de l'espace poral hors agrégat élémentaire :

- dans la croûte de battance qui couvre les billons, des vésicules créent une microstructure « mousseuse » ;
- sous la croûte, les cavités sont nombreuses ; elles sont plus fermées, moins interconnectées que dans les sols non calcaires ; par ailleurs il y a absence de fentes et fissures ;
- la diminution de l'espace poral affecte essentiellement les vides hors de la motte (— 8 %) et se localise dans les horizons sous le niveau de labour (de 15 à 45 cm) ; cette diminution peut être interprétée comme étant principalement un tassement mécanique qui affecte une part importante de la macroporosité.

C. La modification la plus importante est la cimentation des éléments de la structure du sol à l'état sec dans l'horizon directement sous-jacent au niveau de labour. Dans les modifications des formes structurales, les agrégats en forme de boules aplaties se développent dans certains horizons compacts sous le niveau de labour.

En résumé : moins de tassement microscopique, moins de fissuration, plus de tassement entre les mottes, plus de cimentation. Tout ceci résulte, sans aucun doute, de la présence du calcaire et d'une moindre quantité d'argile : le rôle exact de chacun reste à préciser. Dans la mesure cependant où l'agrégat élémentaire est nettement moins touché en milieu calcaire qu'en milieu argileux, on retiendra que les conséquences d'une irrigation mal conduite sont moins graves dans le premier cas que dans le second.

#### 4. QUELQUES CONCLUSIONS AGRONOMIQUES

Les sols de la Basse-Moulouya sont donc modifiés par l'agriculture irriguée, en général à leur désavantage. Le fait le plus marquant concerne la transformation des structures dans les 40-50 premiers cm du sol, avec en particulier un tassement important. Ce tassement affecte les organisations à toutes les échelles ; il est cependant maximum au niveau de l'agrégat élémentaire et dans les horizons les plus proches de la surface. Les différences de tassement influencent la morphologie des structures et des horizons : les profils culturaux des sols irrigués sont fort différents de ceux des sols non irrigués ; ils sont également différents entre eux selon les types de cultures, les modes d'irrigation, les méthodes de travail du sol.

Le tassement est le résultat d'un compactage hydrique et d'un compactage mécanique. Toutes les observations et mesures agronomiques montrent que ces compactages sont néfastes pour la production agricole : il faut donc essayer de les réduire.

Les travaux du sol et les dessiccations moyennes sont

inévitables. On peut cependant envisager de maîtriser les excès d'humectation ou de dessiccation, ainsi que les excès de tassement mécanique. Il convient donc d'essayer de modifier les techniques dans deux domaines : le travail du sol et les méthodes d'irrigation.

##### 4.1. Le travail du sol

A. La technique actuelle de préparation des sols consiste à travailler sur sols très secs en surface en pulvérisant la structure par des labours peu profonds avec des reprises à profondeur presque identiques.

Les différents résultats reconnus néfastes de ce travail sont :

- le fractionnement excessif de la structure de surface qui favorise la constitution ultérieure de la structure massive (horizon Ap1) ;
- la profondeur faible et uniforme de pénétration dans le sol, qui favorise le développement d'une semelle de labour ;
- le tassement mécanique du matériau, moins sec, situé sous le niveau de labour (horizon Ap'2) ;
- la détérioration du nivellement initial.

La seule amélioration est apportée par les labours profonds et les sous-solages : il y a alors élimination des structures continues, moindre tassement de l'agrégat élémentaire, destruction partielle de la semelle de labour.

Les causes de ces résultats sont :

- la sécheresse du sol en surface lors des labours : le labour fabrique dans un sol sec des grosses mottes cubiques qu'il faudra pulvériser par la suite ;
- la sécheresse du sol qui empêche également une pénétration suffisante des disques de labour dans le sol ;
- le poids du matériel de labour qui est à l'origine du tassement mécanique sous le niveau de labour ;
- les charrues à disques qui obligent un labour en planches détruisant ainsi le nivellement initial de la parcelle.

Pour remédier aux inconvénients de la mauvaise structure de surface, il faut pulvériser moins en envisageant le travail du sol à des humidités plus élevées, mais contrôlées ; pour cela il faut travailler avec d'autres outils que la charrue à disque et le pulvérisateur :

- si le sol est trop sec pour le labour (après céréales et luzerne), il faut prescrire la technique de pré-irrigation « demkel » (HANRION *et al.*, 1976) ; il convient de surveiller les teneurs en eau pour éviter que le sol ne devienne trop sensible au compactage (contrôle PROC-TOR et des porosités) ;
- un travail du sol directement après les récoltes (labour ou déchaumage), pour enfouir les résidus de récolte, trouvera un sol moins sec qu'après une longue période de dessiccation ;
- pour un travail de reprise directement après le labour, il faut proscrire les outils de broyage et de

pulvérisation à disques (*cover-crop*) et introduire les outils à dents (herse) (MATHIEU *et al.*, 1979 ;  
— l'introduction de charrues à socs permettrait :  
• des labours plus profonds,  
• un moindre fractionnement des structures,  
• à profondeur égale, un moindre effort de traction qu'avec la charrue à disques (HENIN *et al.*, 1969) ;  
— le labour devrait être modulé selon les cultures ; des préparations sans labour (lorsque la culture précédente a laissé un microrelief compatible avec la nouvelle culture) devraient alterner avec des travaux profonds du sol ; ceci permettrait d'éviter le cumul des tassements et la constitution d'une limite nette de variation importante de la macroporosité à faible profondeur : la rupture du continuum de la macroporosité par le labour a en effet des conséquences négatives importantes sur le drainage de l'eau, la circulation de l'air, la croissance des racelles (DOUGLAS *et al.*, 1980).

B. Le tassement mécanique de l'horizon sous le niveau de labour, par la pression des engins agricoles, peut être difficilement évité. Mais il peut être réduit, voire être détruit par des façons ultérieures. Pour cela, il faut :  
— éviter l'utilisation de tracteurs plus lourds que nécessaire à l'effort de traction demandé ;  
— avoir une bonne connaissance des textures et des humidités correspondant aux limites de compactage afin de prévoir et de contrôler le tassement mécanique ;  
— introduire l'utilisation de roues-cages de dimension moyenne (0,70 à 0,80 m) (DALLEINNE, 1971) ;  
— vulgariser la technique du sous-solage comme une façon régulière en tête de rotation triennale ou quadriennale (MATHIEU *et al.*, 1979) et faire varier la profondeur des labours (voir ci-dessus).

C. L'état du nivellement de la parcelle joue un rôle important sur la régularité de l'humidification à l'irrigation et par conséquent sur la régularité de la levée et de la croissance de la plante. Or, les facteurs responsables de la dégradation du nivellement sont : le profilage en raies et billons courts, le labour en planches avec charrue non réversible, l'utilisation de débits érosifs. Il faut donc :  
— aplanir avant labour les parcelles billonnées (MATHIEU *et al.*, 1979) ;  
— utiliser des charrues réversibles (JOUVE, 1974) ;  
— mieux contrôler les débits en tête de parcelle ;  
— pratiquer régulièrement des planages d'entretien (MATHIEU *et al.*, 1976 ; DAGNELIES, 1977) ;  
— dans le cas de travaux multiples, comme c'est le cas lorsqu'il y a un planage, envisager des trains d'outils combinés afin de limiter les fractionnements excessifs et le nombre de passages.

#### 4.2. Les méthodes d'irrigation

La part de responsabilité des irrigations dans la dégradation de la fertilité morphologique du sol (prise en masse, tassement à toutes les échelles et jusque dans la structure interne de l'agrégat élémentaire) se rattache à deux aspects particuliers des méthodes pratiquées :  
— la submersion ou sursaturation ;  
— l'alternance des conditions hydriques excessives.

Les structures continues et les croûtes de battance, sont essentiellement les conséquences des excès d'eau qui détruisent les agrégations. Les modifications de l'espace poral (tassement des agrégats élémentaires et des mottes, développement d'un système fissural) sont essentiellement la conséquence des excès d'eau alternant avec des dessèchements très poussés.

Les méthodes d'irrigation doivent donc être modifiées en ayant à l'esprit deux objectifs :

— réduire le plus possible les submersions, les sursaturations : il s'agit en particulier de réduire au minimum le contact direct entre la surface du sol et l'eau d'irrigation (RUELLAN 1962, 1964 ; ORSINI *et al.* 1964) ;  
— éviter, entre chaque irrigation, un dessèchement excessif des sols.

Pour ce qui est du dessèchement excessif, le problème essentiel est celui de l'espacement des irrigations : pour économiser l'eau, pour « forcer » les plantes à s'enraciner plus profondément, les agriculteurs ont tendance à espacer les irrigations (et les techniciens le leur conseillent) : c'est très dangereux, nous l'avons vu, pour la fertilité morphologique des sols, donc pour le rendement des cultures. Nous conseillons au contraire, des irrigations rapprochées, en doses évidemment plus faibles. Certaines techniques culturales (binage, paillage, ombrage, ...) doivent également être utilisées pour ralentir l'évaporation directe.

La réduction de la surface de sol directement submergée par l'eau d'irrigation nécessite de revoir complètement les méthodes de l'irrigation gravitaire (1). Il faut, en culture billonnée, élargir les billons et rétrécir les raies ; il faut pour les cultures céréalières et fourragères, remplacer les planches et les bassins fermés par des billons plats irrigués à l'aide de sillons étroits (corrugation ou autres systèmes voisins) ; il faut, dans les vergers, irriguer à la raie (1, 2 ou 3 raies de chaque côté de la rangée d'arbres selon l'âge du verger). Toutes ces méthodes ont été expérimentées avec succès.

*Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 27 mai 1987.*

(1) Nous réduisons nos propos à l'irrigation gravitaire classique (billons, planches, bassins, etc.) encore largement utilisée au Maroc et dans de nombreux pays du monde. Nous n'envisageons pas les méthodes plus modernes (aspersion, goutte à goutte, etc.) encore inaccessibles à la majorité des agriculteurs irrigués pour des raisons de coût, de formation, d'encadrement technique, etc.

## BIBLIOGRAPHIE

- BECKMANN (W.) et GEYGER (E.), 1967. — Entwurf einer Ordnung der natürlichen hohbraun-, aggregat — und structurformen im Boden, in « Die micromorphometrische bodenanalyse », ed. Kubiena : 163-188, Enke Verlag Stuttgart.
- BREWER (R.), 1964. — Fabric and mineral analysis of soils, ed. John Wiley and sons, 470 p., New-York, Sydney.
- BRYSSINE (G.), 1946. — Rapport préliminaire sur les sols de la région des Triffa, Serv. de la Rech. Agro. d'Oujda : 11-18, Rabat.
- BURHIN (Y.), 1975. — « Semoir corrugator polyvalent pour cultures irriguées », D.E.R., C.E., n° 145/75, Rabat. 43 p. *multigr.*
- CHEVRON-VILLETTE (A. de), 1956. — Les sols des Triffa, carte au 1/100 000 (impression en couleur). DMVGR - ORSTOM.
- CHEVRON-VILLETTE (A. de), 1956. — La plaine côtière des Triffa, cartes au 1/20 000. ORSTOM-DMVGR.
- C.P.C.S., 1967. — Classification française des sols, INRA, 38 p., Paris.
- DAGNELIES (E.), 1977. — Le planage d'entretien, D.E.R., C.E., n° 155, Rabat, 10 p., *multigr.*
- DALLEINNE (E.), 1971. — Amélioration des préparations de sols en cultures irriguées sous climat méditerranéen, Rapport F.A.O., C.N.E.E.M.A., Antony, 53 p., *multigr.*
- DOUGLAS (J.T.), GOSS (M.J.) et HILL (D.), 1980. — Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of a radioactive tracer (144 Ce) technique. Soil and Tillage Research, 1 : 11-18, Elsevier, Amsterdam.
- FAO-Unesco, 1974. — Legend of the soil map of the world. Unesco, Paris, 59 p.
- FIES (J.C.), HENIN (S.) et MONNIER (G.), 1972. — Etude de quelques lois régissant la porosité des matériaux meubles, *Ann. Agron.*, 23, 6 : 621-655.
- GRIMALDI (M.), 1977. — Etudes en laboratoire du comportement au tassement du sol limoneux du Rheu (Ille-et-Vilaine), observations micromorphologiques. Mém. D.E.A. de Sciences du Sol, SDS 92, 58 p., E.N.S.A., Rennes.
- GRIMALDI (M.), 1981. — Etude de l'évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse de Doc. Ing., E.N.S.A., Rennes.
- HANRION (M.) et LELIÈVRE (F.), 1976. — Quelques aspects des problèmes liés au travail du sol : pp. 53-98, texte ronéot., in Diagnostic agronomique dans les Béni-Moussa, Départ. Agronomie, Institut Hassan II, Rabat : 53-98, *multigr.*
- HENIN (S.), GRAS (R.) et MONNIER (G.), 1969. — Le profil cultural, éd. Masson, 332 p., Paris.
- HEUSCH (P.), 1960. — Périmètre des Triffa. 5 cartes au 1/20 000 ; 5 cartes au 1/50 000 ; 1 carte au 1/100 000 (tirages Dorel). DMVGR - SOGETIM.
- JOUBE (P.), 1974. — L'aménagement hydro-agricole et les systèmes de production, Hommes, Terre et Eaux, *Bull. de l'A.N.A.F.I.D.*, n° 13 ; 41-55, Rabat.
- MASSONI (Ch.), 1962. — Etudes des sols de la partie Ouest de la plaine du Zébra'. 3 cartes au 1/20 000 : pédologie, salure, tri des sols. ONI. DEG. Berkane.
- MASSONI (Ch.), 1963. — Le Garet, 4 cartes au 1/50 000 : pédologie, classement des sols pour la mise en valeur. Textures, sols salés et alcalisés. ONI - DEG. Mission régionale de Basse-Moulouya. Diffusion limitée.
- MASSONI (Ch.), 1964. — Carte pédologique au 1/50 000 de la plaine des Triffa'. 1 carte pédologique ; 1 carte de classement des sols. ONI - DEG. Berkane.
- MATHIEU (C.), 1978. — Influence de l'irrigation sur l'évolution de quelques caractères fondamentaux des sols argileux des plaines du Maroc Oriental — aspects micromorphologiques. *Sc. du Sol, Bull. de l'A.F.E.S.*, n° 2 : 95-112, Versailles.
- MATHIEU (C.), 1981. — Evolution morphologique des sols soumis à l'irrigation gravitaire en Basse-Moulouya (Maroc Oriental). Thèse Doc. Sc., Fac. Sc., Université de Liège, 436 p., *multigr.*
- MATHIEU (C.), 1982. — Effects of irrigation on the structure of heavy clay Soils in north-east Morocco. Soil and Tillage Research, 2 : 311-329, Elsevier Cy.
- MATHIEU (C.), 1983. — Susceptibilité au tassement PROC-TOR des sols argileux non irrigués et irrigués du Maroc Oriental. *Pédologie*, XXXIII, 1 : 55-76, Gand.
- MATHIEU (C.) et DANGIS (J.), 1976. — Analyse des problèmes de la mise en culture de la betterave sucrière en Basse-Moulouya (Maroc Oriental), Hommes, Terre et Eaux, *Bull. de l'A.N.A.F.I.D.*, n° 18 : 11-36, Rabat et Sucrerie Maghrébine, *Bull. de l'A.P.S.* ; n° 20 : 5-26, Casablanca.
- MATHIEU (C.) et HARRATI (M.), 1980. — Evolution des sols irrigués par gravité des vergers d'agrumes de la plaine des Triffa (Basse-Moulouya), O.R.M.V.A.M., 88 p., 9 fig., 7 phot., Berkane, *multigr.*

- MATHIEU (C.) et HMAMOU (E.K.), 1979. — Expérimentation agro-pédologique sur le travail du sol en milieu irrigué. Objectifs, protocole, premiers résultats. Essai réalisé sur la Station de Slimania, O.R.M.V.A.M., 40 p., *multigr.* Berkane.
- MATHIEU (C.) et HMAMOU (E.K.), 1979. — Concerning the structure of irrigated soils in the north-east of Morocco. Proceedings of the 8th conf. of the Intern. Soil Tillage Research Organisation, I.S.T.R.O. : 371-379 ; University of Hohenheim, Stuttgart.
- MC CORMACK (D.E.) et WILDING (L.P.), 1973. — Proposed origin of lattisepic fabric, Soil Microscopy, 4th, Inter. Working on Soil Micromorpho., Ed. Rutherford : 761-771, Kingston.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.) et FIES (J.C.), 1973. — Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol, *Ann. Agron.*, 1973, 24 (5) ; 533-545, Paris.
- ORSINI (R.), RUELLAN (A.), DEREKOY (A.), MASSONI (C.) et SCHAAP (A.), 1964. — Rapport de l'avant-projet d'aménagement et de mise en valeur de la Basse-Moulouya, O.N.I., M.E.G., 8 volumes, *multigr.*, Berkane.
- RICHARD (L.A.), 1954. — Diagnosis and improvement of Saline and alkali Soils. *Agric. Handb.*, n° 60, 1 volume, 160 p., USDA Washington.
- RUELLAN (A.), 1962. — Note sur les méthodes d'irrigation, O.N.I., M.E.G., 10 p., *multigr.*, Berkane.
- RUELLAN (A.), 1963. — Etude pédologique de la plaine du Zebra. ONI, 358 p., *multigr.*
- RUELLAN (A.), 1965. — Quelques caractéristiques physiques et chimiques des sols de la plaine du Zebra ; leurs répercussions sur les possibilités de mise en valeur. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, 2, 4 : 49-62, Paris.
- RUELLAN (A.), 1971. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse-Moulouya, ORSTOM, Bondy, Mémoire n° 54, 302 p.
- TESSIER (D.) et BERRIER (J.), 1979. — Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols, observation de sols humides soumis à différents pF, Sc. du Sol, *Bull. de l'A.F.E.S.*, n° 1 : 67-82, Versailles.
- USDA, 1975. — Soil Taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, 754 p.