

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS GYPSEUX DE NAPPE DANS LE SUD-TUNISIEN*

par M. POUGET**

SUMMARY

The crust and bedded gypsum deposits at water table level cover a relatively large surface of South Tunisia, and in particular the oases.

In the first part the author studies the formation factors. A reminder of the principal laws of the dissolving and deposition of gypsum underlines especially the antagonistic influences of chlorides (NaCl , MgCl_2) and sulphates (MgSO_4 , Na_2SO_4). A quick survey of the natural medium (climate, geology, hydrology) precedes the study of the phreatic surface water table, the most frequently saturated in sulphate and in calcium; for the chemical composition which varies according to the water of initial origin, from which they are produced.

Several gypsum deposits at water table level profiles are described in chapter II: old crusts or coatings, crusts or deposits now being formed near the surface and deep down.

The formation of the latter is dealt with in a different part. Several factors come into play: seasonal variations in the level and degree of salinity of the phreatic layer, texture and nature of the soil, vegetation. The depositing of gypsum occurs by the concentration of solutions in the earth, according to a classically accepted method.

However, another process, apparently contradictory to the former, can contribute to the precipitation of calcium sulphate. In practice, in the solutions saturated in gypsum in the soil, a reduction in the degree of salinity produces a reduction of chlorides, and thus a relatively small quantity of these remain in relation to the sulphates present, and this results in the lessening of the product of solubility of the gypsum, which is precipitated.

* Cet article fait l'objet d'une publication dans les « Etudes Spéciales » du Service Pédologie de Tunisie. Il constitue une synthèse de travaux effectués dans le cadre de la Convention existant entre le Gouvernement Tunisien et l'ORSTOM.

** Maître de Recherches, Mission ORSTOM Tunisie.

A seasonal cycle of the conditions for depositing is put forward. Also a process of evolution from the state of small deposits up to the forming of a crust is shown in a diagram. Several observations equally help to define the conditions for the depositing of crystals of gypsum of the « sand rose » type.

Finally, it seemed of interest to reserve a special sub-group for the formation of gypsum in layers in the group of salt soils classed as halomorphic soils. (French classification of soils).

RÉSUMÉ

Les croûtes et encroûtements gypseux de nappe occupent une superficie relativement importante dans le Sud-Tunisien, et en particulier dans les oasis.

Dans une première partie, l'auteur étudie les facteurs de formation. Un rappel des principales lois de dissolution et dépôt du gypse, souligne spécialement l'influence antagoniste des chlorures (NaCl , MgCl_2) et des sulfates (MgSO_4 , Na_2SO_4). L'analyse rapide du milieu naturel (climat, géologie, hydrogéologie) précède l'étude des nappes phréatiques le plus souvent saturées en sulfate de calcium, pour une composition chimique variée en relation avec les eaux d'origine profonde, dont elles sont issues.

Quelques profils à croûte ou encroûtements gypseux de nappe sont décrits dans un second chapitre : croûtes et encroûtements anciens, croûtes et encroûtements actuels se formant dans les horizons de surface et de profondeur.

La formation de ces derniers est envisagée dans une autre partie. Plusieurs facteurs interviennent : variations saisonnières de niveau et salure de la nappe phréatique, texture et nature du sol, végétation. Le dépôt de gypse se fait par concentration des solutions du sol, suivant un mode classiquement admis.

Pendant un autre processus, apparemment contradictoire au précédent, peut contribuer à la précipitation du sulfate de calcium. En effet, dans les solutions du sol saturées en gypse, une diminution de salure se traduit par une diminution des chlorures et une teneur relativement moindre de ceux-ci par rapport aux autres sulfates, elle a comme conséquence un abaissement du produit de solubilité du gypse qui précipite. Un cycle saisonnier des conditions de dépôt est proposé. D'autre part, un processus d'évolution depuis le stade des amas jusqu'à la croûte est schématiquement esquissé. Quelques observations permettent également de préciser les conditions de dépôt des cristaux de gypse type « rose des sables ».

Enfin, il apparaît intéressant de réserver un sous-groupe spécial à ces formations gypseuses de nappe dans le groupe des sols salins de la classe des sols halomorphes (classification française des sols).

PLAN

1. — INTRODUCTION

2. — FACTEURS DE FORMATION

2.1. — Lois de dissolution et dépôt du gypse

2.1.1. — Solubilité dans l'eau pure et solutions salines simples

2.1.2. — Solubilité dans les solutions salines complexes telles qu'observées dans la nature

2.1.3. — Dépôt du gypse

- 2.2. — *Le milieu naturel*
 - 2.2.1. — Climat
 - 2.2.2. — Géologie
 - 2.2.3. — Hydrogéologie
 - 2.2.3.1. — Nappes artésiennes
 - 2.2.3.2. — Sources
 - 2.2.3.3. — Composition chimique des nappes artésiennes
- 2.3. — *La nappe phréatique*
 - 2.3.1. — Origine
 - 2.3.2. — Profondeur et frange capillaire
 - 2.3.3. — Salure
 - 2.3.3.1. — Concentration et résidu sec
 - 2.3.3.2. — Composition chimique. Saturation en gypse
3. — DESCRIPTION DE QUELQUES PROFILS A CROÛTE OU ENCROÛTEMENT GYPSEUX DE NAPPE
 - 3.1. — *Croûtes et encroûtements anciens*
 - 3.1.1. — Non soumis à l'action d'une nappe phréatique actuelle
 - 3.1.2. — Soumis à l'action d'une nappe phréatique actuelle
 - 3.2. — *Croûtes et encroûtements actuels se formant dans les horizons de surface*
 - 3.2.1. — Amas gypseux
 - 3.2.2. — Croûtes et encroûtements
 - 3.3. — *Croûtes et encroûtements actuels se formant dans les horizons de profondeur*
 - 3.3.1. — Amas et nodules gypseux
 - 3.3.2. — Croûtes et encroûtements
 - 3.3.2.1. — Croûte gypseuse dans un sable dunaire grossier
 - 3.3.2.2. — Croûte gypseuse dans un sol d'ancienne culture
 - 3.3.2.3. — Encroûtement dans un horizon à texture fine
 - 3.3.2.4. — Croûte dans un ancien encroûtement de surface
 - 3.3.2.5. — Encroûtement dans un sable éolien gypseux
4. — FORMATION DES CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS GYPSEUX
 - 4.1. — *Amas, encroûtements et croûtes se formant dans les horizons de surface*
 - 4.2. — *Croûtes et encroûtements se formant dans les horizons de profondeur*
 - 4.2.1. — Parcelle d'essai de Bou Chemma
 - 4.2.1.1. — Température du sol
 - 4.2.1.2. — Humidité
 - 4.2.1.3. — Salure
 - 4.2.1.4. — Interprétation
 - 4.2.2. — Autres exemples
 - 4.2.3. — Remarques concernant la formation des cristaux de gypse de type « rose de sable »
5. — CLASSIFICATION DES SOLS A CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS GYPSEUX DE NAPPE
 - 5.1. — *Sols halomorphes*
 - 5.2. — *Sols hydromorphes*
6. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES
7. — BIBLIOGRAPHIE

1 - INTRODUCTION

Dans le Sud-Tunisien, l'omniprésence du gypse dans les affleurements géologiques, les sols et les nappes artésiennes, contribue à une grande diversité des formations pédologiques gypseuses.

Ainsi, les plus caractéristiques sont certainement les croûtes et encroûtements de surface décrits par de nombreux auteurs (COQUE, 1962, BUREAU et ROEDERER, 1961, SOURDAT, 1960-1962, LE HOUEROU, 1960 etc.).

Connus depuis plus longtemps (DURAND, 1949-1959, DESSUS, 1955, LE HOUEROU, 1960, NOVIKOFF, 1961), les croûtes et encroûtements gypseux (1) liés à l'évaporation d'une nappe phréatique salée à faible profondeur, vont cependant retenir plus particulièrement notre attention. En effet, un certain nombre d'observations effectuées au cours de prospections dans les oasis et dans le Sud-Tunisien en général, montrent une assez grande diversité de ces formations que l'usage local a consacrées sous les termes de « Terch » ou « Deb-deb ».

Nous désignons par « encroûtement gypseux de nappe », un horizon gypseux et induré (les racines peuvent encore le traverser plus ou moins difficilement) dont l'origine est en relation avec la présence d'une nappe salée. L'horizon peut se trouver en surface ou en profondeur et avoir été enrichi en gypse ou seulement consolidé par la nappe. La « croûte gypseuse de nappe » est simplement l'encroûtement très induré, compact, et impénétrable aux racines.

Après avoir, dans une première partie, examiné les facteurs de formation, quelques types d'encroûtements et croûtes de nappe seront décrits pour essayer d'en préciser ensuite le mode de formation.

2 - FACTEURS DE FORMATION

2.1 - LOIS DE DISSOLUTION ET DÉPOT DU GYPSE (2)

Le gypse, tout en étant plus soluble que le calcaire (0,013 g/l à 16 °C), est nettement moins soluble que les autres sels généralement présents dans les solutions du sol.

2.1.1 - Solubilité dans l'eau pure et solutions salines simples

De très nombreux auteurs ont étudié les lois qui régissent la solubilité du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) dans l'eau pure.

(1) Pour COQUE, la croûte gypseuse désigne uniquement la croûte et encroûtement de surface (sol calcomagnésimorphe), le terme d'encroûtement étant réservé aux formations gypseuses de nappe.

(2) Le gypse $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ est la forme dihydratée du sulfate de calcium anhydre ou anhydrite CaSO_4 que l'on rencontre en très faible quantité dans les sols.

Elle varie suivant la *température* (maximum vers 35-40 °C) en restant aux environs de 2,1 g/l. La solubilité du sulfate semi-hydraté $\text{CaSO}_4, 0,5\text{H}_2\text{O}$ est 5 fois plus grande.

t en °C	CaSO_4 (%)
5	0,1756
10	0,1926
18	0,2016
25	0,2085
30	0,2095
35	0,2105
40	0,2108
55	0,2083
75	0,1880
100	0,1690
107	0,1630

Influence de t sur la solubilité du gypse
(d'après HULETT et ALLEN dans DURAND, 1959).

En présence d'autres sels, la solubilité du gypse, électrolyte faible, se trouve modifiée lorsque l'on introduit dans la solution des électrolytes forts ayant ou non des ions communs avec lui.

Le produit de solubilité K_{ps} du sulfate de calcium est égal, pour une température déterminée, au produit des activités des ions SO_4^{--} et Ca^{++} lorsque la solution est saturée.

Or l'activité a d'un ion est égale au produit de sa concentration C par le coefficient d'activité correspondant f .

$$a = f \cdot C$$

d'où

$$K_{ps \text{ CaSO}_4} = a_{\text{Ca}^{++}} \cdot a_{\text{SO}_4^{--}}$$

$$K_{ps \text{ CaSO}_4} = [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] \cdot f_{\text{Ca}^{++}} \cdot f_{\text{SO}_4^{--}}$$

Action des chlorures

En ajoutant à une solution saturée de gypse des chlorures de sodium ou magnésium sans ion commun avec le sulfate, la force ionique de la solution augmente.

La force ionique μ d'une solution est égale à la demi-somme de la molalité stoechiométrique de chaque ion multipliée par le carré de sa valence :

$$\mu = 1/2(C_1 Z_1^2 + C_2 Z_2^2 + \dots + C_n Z_n^2)$$

C étant la concentration molale ou nombres de moles dans 1 l d'eau.

Z valence de l'ion.

En utilisant les milliéquivalents par litre r , on a donc puisque :

$$r = C \cdot Z \cdot 10^3$$

$$\mu = 1/2(r_1 Z_1 + r_2 Z_2 + \dots + r_n Z_n) \cdot 10^{-3}.$$

La force ionique μ mesure la tension du champ électrique, existant dans la solution. Le coefficient d'activité des ions diminue lorsque la force ionique augmente. Il est donc facile d'expliquer, à partir de

l'équation (1) ci-devant, l'augmentation du produit de solubilité du gypse avec l'introduction de chlorure (NaCl ou MgCl₂) dans la solution. En effet, K_{ps} CaSO₄ restant rigoureusement constant pour une température donnée, les coefficients d'activité $f_{SO_4^{--}}$ et $f_{Ca^{++}}$ s'abaissent ; le produit $[SO_4^{--}][Ca^{++}]$ et par conséquent la solubilité du gypse augmente.

Comme pratiquement, on a généralement affaire à des solutions dans lesquelles figurent plusieurs sels différents à des concentrations plus ou moins fortes qu'on ne connaît pas avec précision, il n'est guère possible de se servir des coefficients d'activité.

Le tableau ci-dessous donne les variations du produit de solubilité de CaSO₄ en fonction de la température et de la concentration en NaCl avec la force ionique correspondante sans tenir compte des coefficients d'activité.

NaCl		CaSO ₄ en mé		CaSO ₄ en g/kg		Force ionique μ		Produit de solubilité $K_{ps} = [SO_4^{--}][Ca^{++}]$	
g	mEq	14°	20°	14°	20°	14°	20°	14°	20°
0	0	25	31	1,70	2,10	0,050	0,062	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$
2,925	50	34	40	2,32	2,70	0,118	0,130	2,90 »	4,00 »
5,850	100	41	46	2,78	3,15	0,182	0,192	4,20 »	5,30 »
11,70	200	50	55	3,41	3,75	0,300	0,210	6,25 »	7,56 »
14,62	250	54	59	3,68	4,00	0,358	0,368	7,30 »	8,12 »
29,25	500	65	69	4,40	4,70	0,650	0,638	10,56 »	10,85 »
58,50	1 000	84	88	5,72	6,00	1,168	1,176	17,64 »	19,36 »
87,75	1 500	97	101	6,58	6,85	1,694	1,702	23,5 »	25,5 »
102,3	1 750	101	105	6,90	7,15	1,952	1,960	25,5 »	27,5 »
117,0	2 000	104	107	7,10	7,30	2,208	2,214	27,0 »	28,6 »
131,6	2 250	106	107	7,20	7,30	2,462	2,464	28,1 »	28,6 »
146,2	2 500	104	105	7,10	7,13	2,708	2,710	27,0 »	27,5 »
160,8	2 750	103	103	7,00	7,05	2,956	2,958	26,5 »	26,5 »
175,6	3 000	100	100	6,80	6,80	3,200	3,200	25,0 »	25,0 »
204,7	3 500	93	93	6,30	6,30	3,686	3,686	21,6 »	21,6 »
234,0	4 000	87	87	5,90	5,90	4,174	4,174	18,9 »	18,9 »
263,2	4 500	81	81	5,50	5,52	4,662	4,662	16,4 »	16,4 »
292,6	5 000	78	78	5,30	5,30	5,156	5,156	15,2 »	15,2 »

d'après ANSELME ALEX (1903).

Le chlorure de magnésium augmente la solubilité du sulfate de calcium dans des proportions comparables et même supérieures à celles du chlorure de sodium.

grammes/litre de solution		
MgCl ₂	CaSO ₄	H ₂ O
0,00	2,08	997,9
8,50	4,26	996,5
19,18	5,69	994,5
46,64	7,59	989,1
121,38	8,62	972,2
206,98	6,57	949,9
337,00	2,77	908,7
441,10	1,39	878,6

d'après CAMERON, SEIDELL and SMITH

En résumé, la solubilité du gypse à la température ambiante, de l'ordre de 2 g/l augmente jusqu'à 7 g/l dans des solutions contenant environ 120-130 g/l de chlorure de sodium ou magnésium. Elle diminue ensuite pour des solutions plus concentrées en chlorure.

Action des sulfates de sodium et magnésium

En ajoutant à une solution saturée de sulfate de calcium une certaine quantité de sulfate de magnésium par exemple, le produit des concentrations des ions $[\text{SO}_4^{--}][\text{Ca}^{++}]$ devient supérieur au produit de solubilité du sulfate de calcium. La solution devient sursaturée et doit déposer tôt ou tard, une partie du corps le moins soluble (sulfate de calcium) sous forme de phase solide (précipitation).

La solubilité du gypse diminue en présence de sulfate de magnésium ou sodium sous l'effet d'ion commun.

Action du pH

Par suite de la fixation des ions SO_4^{--} par les ions H^+ avec formation d'ions HSO_4^- , la solubilité du gypse augmente un peu en milieu acide. La précipitation est moins complète pour un pH fortement acide que pour un pH neutre ou alcalin. En fait, ce phénomène ne peut guère intervenir car dans tous les sols gypseux étudiés le pH est toujours supérieur à 7.

Action du bicarbonate de calcium

Dans une solution saturée en gypse et en calcaire, une augmentation de la tension de CO_2 permettant une nouvelle dissolution de CaCO_3 augmente le nombre d'ions Ca^{++} et précipite ainsi une certaine quantité de gypse dont la solubilité a diminué (SCHOELLER, 1962, AKHVLEDIANI, 1963, TOLCHEL'NIKOV, 1962).

2.1.2 - Solubilité dans les solutions salines complexes telles qu'observées dans la nature

D'une façon générale, dans les nappes artésiennes profondes, les nappes phréatiques et les solutions du sol, le gypse est mélangé en proportions variables à des sels dont les plus importants sont : chlorure de sodium, sulfates de sodium et surtout magnésium, bicarbonate de calcium. Contrairement à ce que l'on observe dans d'autres régions (Tchad), le carbonate de sodium ne se trouve pratiquement jamais dans les sols du Sud-Tunisien car la salure n'est pas d'origine continentale mais marine.

A partir de l'analyse chimique d'une solution, il est très intéressant de savoir si la saturation en gypse est atteinte ou au contraire si la solution n'est pas saturée. SCHOELLER (1958) propose l'utilisation de diagrammes semi-logarithmiques pour représenter la composition chimique des eaux. Cette représentation permet une comparaison rapide et pratique d'échantillons différents. En outre, elle permet d'indiquer, d'une manière très simple si le produit de solubilité est atteint.

On peut comparer pour une eau quelconque, la valeur S représentant le produit de solubilité obtenue à partir des résultats de l'analyse et la valeur S_0 du produit de solubilité calculée en fonction de la force ionique μ de la solution (1).

(1) Pour le calcul, nous n'avons pas tenu compte du potassium K^+ (non dosé dans les analyses courantes) toujours très faible relativement au sodium Na^+ . Approximativement, on suppose aussi que la force ionique a le même effet que celle qui résulte des deux sels CaSO_4 et NaCl : Tableau, page 56.

Exemples (voir graph. n° 1)

Origine	Résidu sec en g/l	mé/litre						Force ionique μ à 20°
		Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃ H	
Eau de mer.....	31,980	20,0	92,0	399,4	440,0	57,1	2,6	0,590
El Hamadi n° 44	14,100	24,0	18,0	164,0	112,0	71,2	8,6	0,255
Kriz n° 9 bis	20,640	63,0	61,0	216,0	251,0	80,5	6,8	0,441
Bou Chemma n° 4	6,600	32,0	25,6	40,2	37,0	54,7	5,4	0,154
Djerba n° 80	3,680	31,6	9,2	14,3	11,0	40,1	2,4	0,095

Eau de mer

— S_0 correspond à la force μ calculée soit 0,590,

— S est obtenu en joignant Ca et SO₄ par une droite qui coupe l'axe de Na, sur lequel sont portées les valeurs de μ , en un point S ou $\mu \neq 0,09$.

L'eau de mer n'est pas saturée en gypse car S se trouve au-dessous de S_0 . On retrouve ici un fait connu pour l'eau de mer.

El Hamadi n° 44 (près de Zarzis). — POUGET, 1967a

Nappe phréatique du profil décrit page 86.

$$S_0 = 0,255$$

$$S \neq 0,15$$

La saturation en gypse n'est pas atteinte. L'eau est donc capable de dissoudre encore du gypse.

Kriz n° 9 bis. — POUGET, 1966b

Nappe phréatique du profil décrit page 77.

$$S_0 = 0,441$$

$$S \neq 0,65$$

S se trouve au-dessus de S_0 , donc l'eau est sursaturée en gypse.

Bou Chemma n° 4. — EL AMAMI, BALDY, POUGET, 1967

Nappe phréatique dans le puits busé n° 4 de la parcelle d'essai de Bou Chemma

$$S_0 = 0,154$$

$$S \neq 0,15$$

S et S_0 ayant sensiblement la même valeur, la nappe est saturée.

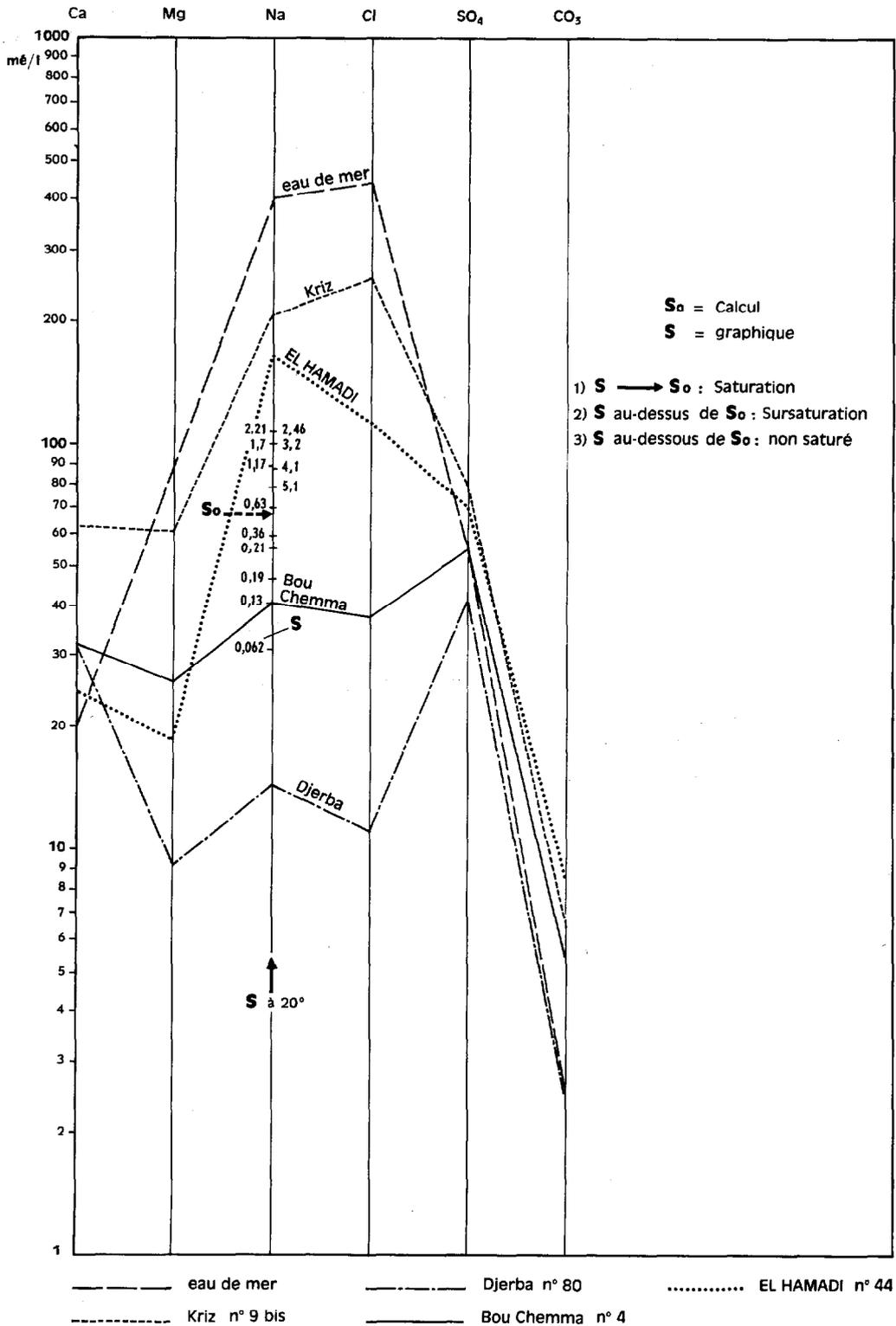
Djerba n° 80. — POUGET, 1967b

Nappe phréatique du profil décrit page 81.

$$S_0 = 0,095$$

$$S \neq 0,09$$

L'eau est saturée en gypse.

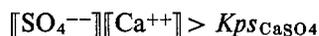


En définitive, la saturation en gypse d'une solution est atteinte même pour un résidu sec peu élevé : 3-4 g/l profil n° 80 de Djerba. Par contre, l'eau de mer n'est pas saturée pour une salure de 32 g/l. Elle reste capable de dissoudre du gypse en raison d'une forte teneur en chlorure de sodium.

Plus que la concentration absolue en sels (résidu sec), la composition ionique rend compte de la nature exacte des solutions. Dans la solubilité du gypse, le chlorure de sodium et le sulfate de magnésium jouent un rôle déterminant qui sera précisé avec l'étude de la composition chimique des nappes.

2.1.3 - Dépôt du gypse

Théoriquement, le précipité ou dépôt de gypse se forme lorsque le produit des concentrations de ses ions (produit ionique) dans la solution dépasse la valeur de son produit de solubilité à la température donnée.



En réalité, le produit ionique peut parfois dépasser le produit de solubilité sans qu'il y ait pour autant dépôt. La solution se trouve dans le domaine de métastabilité. Ainsi dans une solution faiblement sursaturée, il n'y a pas formation de grains de cristallisation « cristallites ». Le développement des cristaux n'est possible qu'en introduisant des germes cristallins de très petite taille. La sursaturation a des limites au-delà desquelles il y a cristallisation spontanée.

Le plus souvent la *concentration* des solutions est responsable du dépôt de gypse. Ainsi l'expérience (Tableau d'USIGLIO cité dans FINATON, 1934) montre que, pour l'eau de mer, le gypse commence à se déposer quand l'eau a perdu plus des 3/4 de son volume. Le chlorure de sodium commence à se déposer lui aussi lorsque les 9/10 de l'eau se sont évaporés. En fait, dans la nature, la concentration des solutions s'accompagne toujours d'une modification de la composition ionique et ceci a une grande importance.

D'autre part, le *mélange* de deux solutions différentes peut amener des précipitations. Une eau à forte teneur de Ca^{++} peut précipiter le calcaire ou le gypse d'une autre eau. Une forte teneur en SO_4^{--} peut en se mélangeant précipiter le CaSO_4 (SCHOELLER, 1962).

2.2 - LE MILIEU NATUREL

Sous le vocable de Sud-Tunisien, on envisage l'ensemble de la région située au sud d'une ligne schématique Sfax-Gafsa.

2.2.1 - Climat (1)

Il se caractérise par son aridité adoucie plus ou moins par l'influence marine du golfe de Gabès.

— *La pluviométrie* dont la moyenne annuelle se situe entre 50 et 200 mm au maximum est très irrégulière. Les précipitations souvent violentes ont toujours lieu pendant la saison froide, d'octobre à avril avec 2 maxima (novembre et mars). On enregistre des pluies de 50 à 100 mm en quelques heures.

(1) Les données climatiques de cette région sont largement développées par H.N. LE HOUEIROU, 1959.

— *Températures.* La moyenne annuelle des températures est comprise entre 19° et 22° (Ghadamès à l'extrême sud).

Les moyennes mensuelles enregistrent de gros écarts entre l'hiver et l'été.

	Tozeur	Gabès
Janvier	10,5°	11,4°
Juillet	32,5°	26,8°

La saison chaude ($t > 25^\circ$) dure 4 mois à Tozeur (juin à septembre) et 3 mois à Gabès (juillet à septembre). En hiver la température s'abaisse parfois au-dessous de zéro surtout pour les stations continentales.

— *Le déficit de saturation*, très élevé en été pour ces mêmes stations (entre 15 et 30 mbar par mois) s'abaisse aux environs de 10 en bordure du golfe de Gabès.

— *Evapotranspiration potentielle.* Un certain nombre de mesures directes (évapotranspiromètres avec Kikuyu à Gabès et Ksar Rhilane) montrent une ETP journalière estivale de 7 à 10 mm par jour et beaucoup plus par temps de sirocco (DAMAGNEZ, 1963).

Année 1962 : Station d'Ain Zérig (Gabès)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
ETP mesurée en mm	71	47	104	127	159	164	212	183	112	101	82	48	1 410
P pluie en mm ..	5,0	0,8	19,3	14,0	0	0	0	0	26,8	0,5	111,1	0	177,5

— *Les vents* violents de toutes les directions contribuent encore à augmenter l'évaporation avec une insolation toujours élevée. Leur action se manifeste aussi par un intense transport de sable : vents de sable et dunes (Kébili, Douz).

— *Conclusions.* Globalement le climat de la Tunisie Méridionale se caractérise par :

- Une saison froide avec quelques précipitations, mais où le bilan hydrique reste déficitaire.
- Une saison chaude de mai à octobre, très sèche avec une forte évaporation.
- Un gradient d'aridité croissant du littoral vers l'intérieur.

L'ensemble de la zone est classé dans les étages climatiques *aride et saharien* :

- sous-étages arides inférieur et supérieur à hivers tempérés, doux ou chauds.
- sous-étages sahariens inférieur et supérieur à hivers frais et tempérés.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des indices d'aridité :

Stations	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>Q</i>	<i>X</i>
Sfax	199	18,9	28,0	—
Djerba	207	20,0	29,0	190
Gabès	175	19,3	22,2	266
Kebili	89	20,9	7,6	—
Tozeur	89	21,3	8,4	336

P = pluviosité moyenne annuelle en millimètres.

T = température moyenne annuelle.

Q = indice d'Emberger.

X = indice xérothermique de Bagnouls et Gaussen.

Le drainage calculé, d'après la formule de HENIN et AUBERT, pour déterminer la quantité d'eau qui draine dans le sol est nettement inférieure à 30 mm (quelques millimètres) :

$$D = \frac{\gamma P^3}{1 + \gamma P^2}$$

avec : *P* = pluviosité annuelle en millimètres,

$$\gamma = \frac{1}{0,15T - 0,13}$$

T = température moyenne annuelle.

Les sols se trouvent dans la zone des sols désertiques à croûte gypseuse et salins. Néanmoins, à l'occasion de fortes pluies et en raison de la texture sableuse un lessivage des sels se produit entraînant une diminution sensible de la salure dans les horizons de surface. Ainsi, dans l'oasis de Béchima (El Hamma de Gabès) une pluie de 60 mm, le 12 février 1967, a permis un lessivage sensible des sels dans l'horizon de surface d'un sol halomorphe salin.

Profondeur (cm)	Conductivité (m · m h/cm)	
	Avant	Après
0 - 20	78	52
20 - 65	44	50

2.2.2 - Géologie

La plupart des couches géologiques, du trias inférieur au mio-pliocène, formant le soubassement de cette région, sont gypseuses (CASTANY, 1953) :

- Gypses massifs du Trias supérieur et Jurassique inférieur.
- Marnes et argiles bariolées gypseuses, anhydrite du Crétacé à faciès wealdien en bordure du Chott Fedjedj.
- Marnes et argiles gypseuses du Mio-Pliocène, etc.

D'autre part, d'énormes réserves de gypse se sont concentrées au cours des différentes périodes du Quaternaire dans les dépressions fermées : Chotts (Djerid, Rharsa, Fedjedj) et Sebkhass (1). Leur accumulation est la résultante de l'érosion par ruissellement depuis les bassins versants gypseux et de l'arrivée en surface des eaux profondes elles-mêmes salées. L'évaporation des solutions sur ces immenses étendues que sont les Chotts a entraîné le dépôt du gypse en très fins cristaux lenticulaires. Repris par le vent et transportés au loin, ils forment notamment les dunes de sables gypseux si fréquents dans la région de Kébili.

Les différentes pulsations climatiques du Quaternaire ont permis cette succession plus ou moins régulière : mise en solution, dépôt et transport par le vent. Ainsi s'établit un cycle régional du gypse avec comme conséquence de multiples formations gypseuses constituant la roche-mère de très nombreux sols.

2.2.3 - Hydrogéologie

2.2.3.1. — LES NAPPES ARTÉSIENNES

L'existence de nappes artésiennes de débit, salure et profondeur variables constitue une caractéristique extrêmement importante comme source et agent vecteur du gypse.

La nappe saharienne du *Continental intercalaire* (Crétacé inférieur) présente de loin les plus forts débits encore peu exploités (Seftimi, CF₁, CF₂, CF₃) en bordure du Chott Fedjedj. Cette nappe « déborde » à l'est de la fermeture anticlinale du Fedjedj à l'occasion du système de faille d'El Hamma (sources chaudes) et va alimenter la *nappe de Gabès* localisée dans les calcaires du Cénomaniens et du Turonien. Poursuivant son trajet vers le S-E, elle parvient dans les sables verts miocènes : *nappe du Miocène* de Zarzis-Djerba-Ben Gardanne en bordure de la mer. La profondeur reste aux environs de 150 - 200 m, mais la salure augmente beaucoup.

Dans le Nefzaoua, la *nappe du Campanien* alimente une série de sources et forages depuis Douz jusqu'à la presqu'île de Kébili. La *nappe du Djerid* se localise elle dans les calcaires du Sénonien et les sables du Pontien dans la région de Tozeur-Nefta.

Au sud de Tatahouine, la *nappe du Kimmeridgien* (jurassique) entretient une série de petites sources et forages d'importance minime.

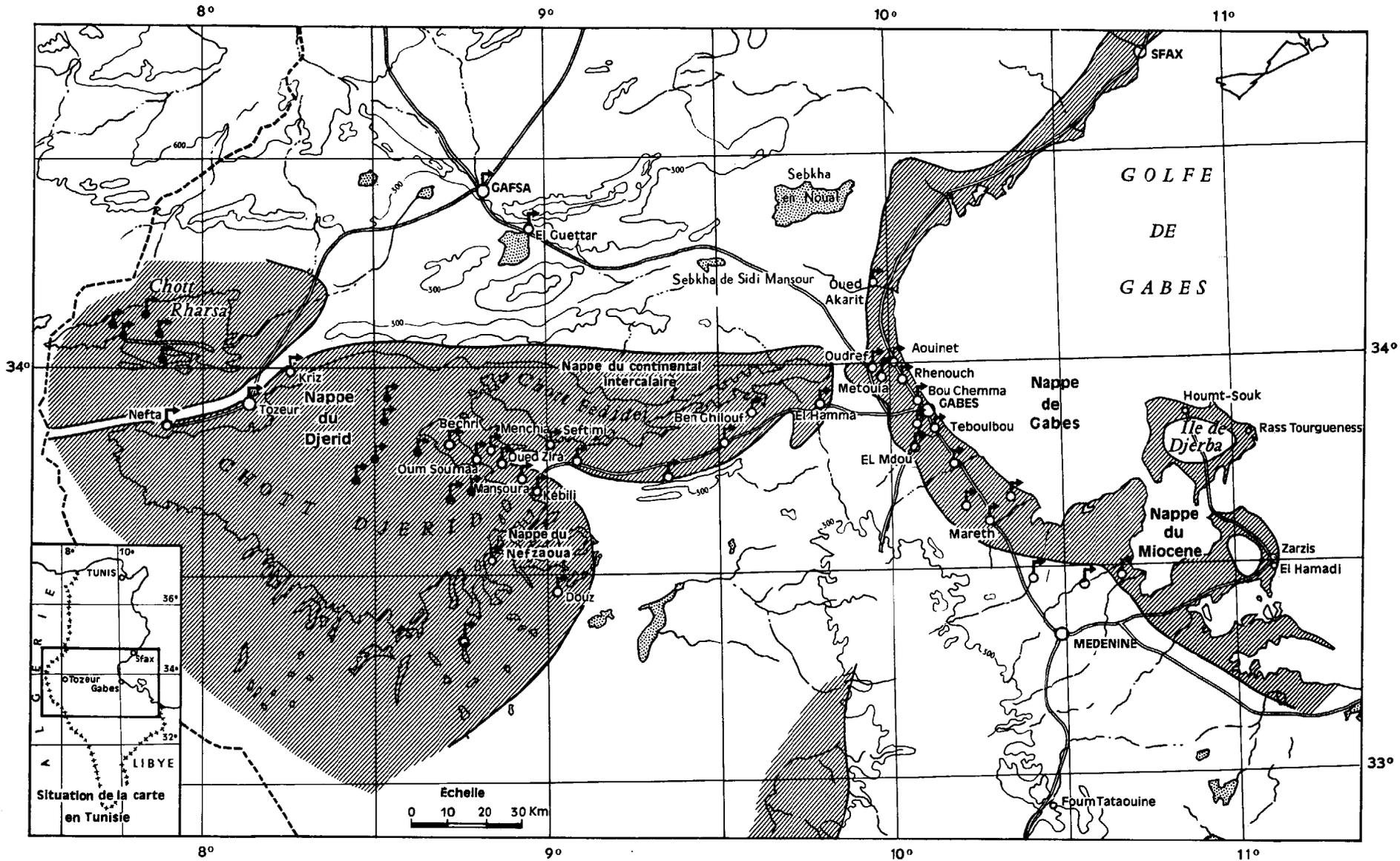
L'ensemble des nappes actuellement exploitées en partie par des forages, est utilisé pour l'irrigation des oasis et des périmètres irrigués.

2.2.3.2. — LES SOURCES

En fait, bien avant l'exécution de ces forages, existaient de très nombreuses sources, exutoires naturels des eaux artésiennes profondes. Les plus anciennes oasis, remontant au moins à l'époque romaine, se situent en aval des sources : Nefta, Tozeur, Gafsa, Kébili, Telmine, Mansoura, El Hamma de Gabès, Métouia, Oudref, Rhenouche, Teboulbou, Gabès, etc.

Il est intéressant de noter avec COQUE (1962) que : « Les niveaux statiques des grands appareils artésiens du Sud-Tunisien se situaient à plusieurs mètres au-dessus des cotes actuelles » et cela en relation

(1) L'ouvrage de R. COQUE, 1962, « La Tunisie présaharienne » offre une étude complète sur la géologie et la géomorphologie de ces régions.



avec une suralimentation liée à des conditions climatiques plus favorables (Pluvial). Avec l'aridité croissante, le niveau des sources s'est abaissé jusqu'à nos jours d'une façon plus ou moins régulière. De même, une surexploitation des nappes par les forages entraîne le tarissement de nombreuses sources (Kébili, Oudref, Métouia, Rhenouche, etc.).

La répartition géographique de ces sources (« Aïn ») n'est pas quelconque. Elles se localisent en effet dans les zones d'artésianisme car ce sont des sources vraies provenant des nappes artésiennes. Il ne s'agit donc, ni de résurgences, ni d'exurgences. Parfois la venue d'eau n'est pas localisée mais se fait sur une grande étendue ; on parle alors d'*émergences* (SCHOELLER, 1962). On peut également distinguer différents types de sources selon qu'elles se trouvent en relation avec un substratum géologique faillé (El Hamma de Gabès, Teboulbou, Gabès, Nefzaoua) ou qu'elles prennent naissance à la limite de l'affleurement toit-roche magasin comme dans le Djerid avec les sables du pontien (roche-magasin) et les argiles gypseuses du pontien supérieur (toit) ; ce sont alors des nappes de débordement.

Nappe	Forage	Composition chimique														
		Résidu sec (g/l)	mg/l							m ^é /l						
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃	Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃	Cl/SO ₄	
Continental Intercalaire	CF 1	3,084	393	52	564	710	1 269	96	19,7	4,3	24,5	20,0	26,4	3,2	0,76	
Gabès	Gabès (Source)	2,960	400	131	470	710	1 244	75	20,0	10,8	20,4	20,0	25,9	2,5	0,77	
	Bou Chemma	3,080	380	111	380	577	1 220	76	19,0	9,3	16,5	16,3	25,4	2,5	0,64	
Miocène	El Hamadi (Zarzis)	5,920	271	131	1 646	2 000	1 746	99	13,5	10,8	71,6	56,3	36,4	3,3	1,55	
Nefzaoua	Douz	1,206	117	45	173	337	300	60	5,9	3,8	7,5	9,4	6,4	2,0	1,47	
	Tembib	1,740	187	86	276	532	503	72	9,4	7,2	12,0	15,0	10,5	3,1	1,43	
Djerid	Nefta	2,480	312	107	340	576	979	75	15,6	8,0	14,7	16,2	20,3	2,5	0,80	
	Kriz (Source)	2,116	188	82	462	810	492	72	9,4	6,8	20,1	23,0	10,2	2,4	2,25	
	Helba	2,028	183	77	402	604	635	72	9,1	6,4	17,5	17,0	13,2	2,4	1,29	

Exemples de composition chimique des principales nappes artésiennes

2.2.3.3. — COMPOSITION CHIMIQUE DES NAPPES ARTÉSIENNES

Le tableau ci-dessus montre une salure variable mais spécifique pour chacune des nappes artésiennes.

La nappe du Continental intercalaire et évidemment celle de Gabès ont un taux de sulfates supérieur aux chlorures ($Cl/SO_4 < 1$). Par contre, le rapport s'inverse avec la nappe du Miocène.

La nature des terrains aquifères influe sur la composition chimique des nappes :

— Importance du magnésium pour Gabès car elle est localisée dans des calcaires dolomitiques.

— Augmentation de salure de la nappe du Nefzaoua au cours de son cheminement en se rapprochant du Chott Djerid.

— Pour les sources de la presqu'île de Kébili, la salure augmente de 1,6 à 4 g/l et le rapport Cl/SO₄ passe de 1,4 à 0,5, en allant de Mansoura à l'est, vers Fatnassa à l'extrémité ouest de la presqu'île dans le Chott Djerid (POUGET, 1966a).

Sources	Résidu sec (g/l)	Cl/SO ₄
Mansoura	1,6 à 1,9	1,4 à 1,3
Oued Zira	2,0 à 3,0	1,4 à 0,7
Oum Soumaa	2,7 à 4,0	0,9 à 0,7
Fatnassa	3,5 à 4,0	0,7 à 0,5

La proximité du Chott et surtout la nature de plus en plus gypseuse des terrains traversés explique le gradient chimique. La concentration de la nappe se fait par dissolution.

En conclusion, avec l'aridité du climat, la présence des sources, émergences et forages représente le facteur fondamental pour la dynamique des sels. En effet, le vecteur eau indispensable est ainsi apporté régulièrement et depuis longtemps. Le ruissellement des eaux d'origine météorique ne fournit qu'une aide épisodique et relativement peu efficace. Cet apport des eaux profondes salées se manifeste en surface par la formation d'oueds à débit pérenne, de sebkhas, de nappes phréatiques et d'une façon générale de sols halomorphes le plus souvent gypseux.

Il s'agit là d'un indice très important que les hydrologues et hydrogéologues (TIXERONT) utilisent depuis de nombreuses années pour la recherche et l'exploitation des nappes profondes.

2.3 - LA NAPPE PHRÉATIQUE

2.3.1 - Origine

L'existence d'une nappe phréatique à faible profondeur (entre 0 et 3 m) est liée à un mauvais drainage des eaux de ruissellement mais surtout des eaux d'origine profonde. La pluviométrie ne peut être évoquée pour expliquer leur maintien tout au long de l'année sous un climat aussi aride. A l'occasion de fortes pluies, l'accumulation d'eau dans une dépression fermée peut se produire avec parfois formation d'un plan d'eau temporaire. En 1962-1963 la Sebkha de Sidi-Mansour et la gara Zougrata se sont transformées en véritables lacs. Deux ans après, non seulement toute l'eau avait disparu, mais la nappe phréatique se trouvait à plusieurs mètres de profondeur, consécutivement à une longue période de sécheresse.

Il est évident que, seule une alimentation continue dans le temps rend possible l'existence d'une nappe phréatique permanente. Effectivement, on trouve de telles nappes dans les oasis, les sebkhas, les grands Chotts (COQUE, 1962) et plus généralement dans toutes les zones de sources et d'émergences artésiennes.

En bordure de mer, les infiltrations latérales des eaux marines déterminent également la formation d'une nappe phréatique dans les zones basses et les deltas alluvionnaires.

D'autres facteurs classiques interviennent pour favoriser la présence de nappe. En particulier, la texture du sol (horizons à texture fine, compacts et peu drainants) et la topographie (pente insuffisante, bas-fonds sans exutoire) jouent un rôle non négligeable.

2.3.2 - Profondeur et frange capillaire

Nous envisageons seulement ici le cas des nappes phréatiques permanentes et non les nappes temporaires. La profondeur exprime un équilibre ou un bilan entre les apports (irrigations, pluies, émergences artésiennes) et les pertes (évaporation, végétation, écoulement latéral). On observe le plus souvent une variation saisonnière.

En été, la nappe devient plus profonde en relation avec la pluviométrie sensiblement nulle. L'évaporation et l'activité racinaire alors intenses contribuent au dessèchement des horizons profonds. D'autre part, la température plus élevée du sol en période chaude assure un écoulement plus rapide de la nappe.

En hiver, les mêmes phénomènes jouent en sens inverse et le niveau de la nappe se rapproche de la surface du sol. L'amplitude des variations été-hiver atteint facilement un mètre et souvent plus.

D'autres variations sont également possibles en particulier dans les oasis avec les irrigations (jusqu'à 1 m parfois). La nappe se stabilise alors en quelques jours.

Au-dessus du niveau de la nappe et sur une certaine hauteur, l'ascension capillaire de l'eau à travers les pores du sol maintient un taux d'humidité presque constant et voisin de la capacité de rétention : c'est la hauteur d'ascension capillaire (frange capillaire).

Classiquement d'après KEEN cité dans DUCHAUFOUR (1965) on peut retenir les chiffres suivants pour la hauteur d'ascension capillaire :

- 2 m (maximum observé) sol argilo-humique,
- 1 à 1,20 m sol limoneux,
- 0,40 m sol graveleux ou sableux.

Par contre, la vitesse et le débit de l'eau, ainsi fournie aux horizons supérieurs, diminuent rapidement pour les sols à texture fine.

Pratiquement, dans les sols sableux à finement sablo-limoneux, la hauteur d'ascension capillaire se situe entre 0,50 et 1,30 m. Dans l'oasis de Gabès (BEN SALAH, 1966) une série de mesures sur le terrain laissent supposer un chiffre de 0,80 m. La présence de gypse peut augmenter la hauteur d'ascension (hygroscopicité du gypse), mais diminuer la vitesse et le débit de l'eau transitée, comme le font certainement les autres sels dissous dans la solution du sol. Avec une nappe salée, il est relativement facile de connaître la hauteur d'ascension capillaire dans un sol. En effet, dès que la frange capillaire atteint la surface du sol, la salure de l'horizon supérieur devient très importante en l'absence d'irrigations (EL GABALY, 1964). Ainsi dans l'oasis de Béchima, nous avons trouvé une hauteur de 1,20 à 1,30 m dans un sable fin d'origine éolienne et très peu gypseux (85 % de sable fin, 9 % de calcaire, 2 % de gypse). Si la nappe est plus profonde, il n'y a pas d'accumulation de sels en surface.

2.3.3 - Salure

2.3.3.1. — CONCENTRATION ET RÉSIDU SEC

La salure de la nappe phréatique est extrêmement variable de quelques grammes par litre à 100 g/l, et parfois plus, de résidu sec.

La *végétation* constitue un des facteurs principaux de minéralisation de la nappe. En effet, l'évaporation directe par le sol représente quantitativement une part peu importante de l'eau retournant à l'atmo-

sphère. Par contre, l'absorption d'eau par les racines atteint annuellement quelques centaines de millimètres contribuant ainsi à une augmentation sensible de la concentration : l'aridité du climat (température élevée et sécheresse de l'air) accentue cette transpiration végétale.

D'autre part, la nature du couvert intervient également ; sous forêt ou végétation arbustive, les racines sont à la fois plus actives et plus profondes ; en été, l'abaissement du niveau de la nappe est très important (DUCHAUFOR, SCHOELLER). Dans les oasis, on observe effectivement une légère augmentation de la salure durant la saison sèche alors que la nappe s'approfondit (Gabès, Bou Chemma, Kébili). Parfois même, entre deux irrigations suffisamment espacées, la salure de la nappe augmente puis diminue avec une nouvelle irrigation. En effet, les racines de palmiers s'alimentent dans la nappe peu profonde (1 m) à défaut d'irrigation et la salure augmente pour diminuer avec un apport d'eau. Dans de nombreux profils, la présence d'un horizon très induré (croûte gypseuse par exemple) ne permet pas une telle alimentation jusqu'à la nappe.

La *nature du sol* et la *topographie* interviennent dans le processus de salure de la nappe. Ainsi dans les oasis on distingue le plus souvent :

- une zone haute bien drainée, avec nappe profonde et peu salée ;
- une zone moyenne intermédiaire ;
- une zone basse mal drainée avec nappe salée proche de la surface.

La nappe se sale au fur et à mesure que les sols deviennent plus salés mais eux-mêmes sont en relation avec la profondeur et la salure du plan d'eau. Il y a interaction constante entre les deux phénomènes.

2.3.3.2. — COMPOSITION CHIMIQUE - SATURATION EN GYPSE

L'analyse chimique d'une multitude de nappes montre une teneur variable en cations (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et anions (Cl^- , SO_4^{--} , CO_3H^-). Les sels correspondants sont pour les principaux : chlorure de sodium, gypse, sulfates de magnésium et sodium, chlorure de magnésium, bicarbonate de calcium.

L'augmentation de salure d'une nappe comme d'ailleurs des solutions du sol obéit à deux lois fondamentales observées dans la nature. La première indique une élévation du taux de chlorures parallèlement à l'augmentation de la concentration. Pour la seconde, la salure croissante d'une eau conduit presque toujours à une composition chimique analogue à l'eau de mer où $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{CO}_3$ et $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$.

Ainsi pour la nappe phréatique dans l'oasis de Menchia (Kébili) la différence Na—Mg croît régulièrement avec la conductivité (fig. 1).

D'autre part, les nappes phréatiques présentent des compositions chimiques variées et originales à l'image des eaux dont elles sont issues et également des sols où elles circulent. Le tableau ci-dessous illustre pour un même résidu sec : 9,2 g/l la différence pouvant exister entre deux nappes phréatiques et la similitude de composition chimique entre l'eau d'irrigation et la nappe correspondante.

Si pour l'eau d'irrigation $\text{Cl}/\text{SO}_4 > 1$, quelle que soit la valeur du résidu sec de la nappe phréatique, le rapport est toujours supérieur à 1 et augmente régulièrement : Nefzaoua sauf la presqu'île de Kébili, Djérid sauf Nefta, Zarzis.

Si pour l'eau d'irrigation $\text{Cl}/\text{SO}_4 < 1$, le rapport reste inférieur à 1, pour les résidus secs peu élevés et ensuite dépasse l'unité. Ainsi, dans l'oasis de Gabès la prédominance des chlorures sur les sulfates se manifeste pour une salure de 9-10 g/l soit une conductivité de 13 m·mhos/cm environ (à Nefta 10 g/l, DIMANCHE, 1964).

Lieu	Résidu sec (g/l)	mé/litre						Cl/SO ₄	SO ₄ /Ca
		Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃		
Kriz (source)	2,116	9,4	6,8	20,1	23,0	10,2	2,4	2,3	1,1
Kriz (nappe du profil n° 4) ..	9,320	47,0	27,0	74,0	102,0	42,2	5,4	2,4	0,9
Bou Chemma (forage)	3,080	19,0	9,3	16,5	16,3	25,4	2,5	0,6	1,3
Bou Chemma (nappe du puint busé n° 7)	9,200	30,0	40,0	65,5	53,0	73,4	8,3	0,7	2,4

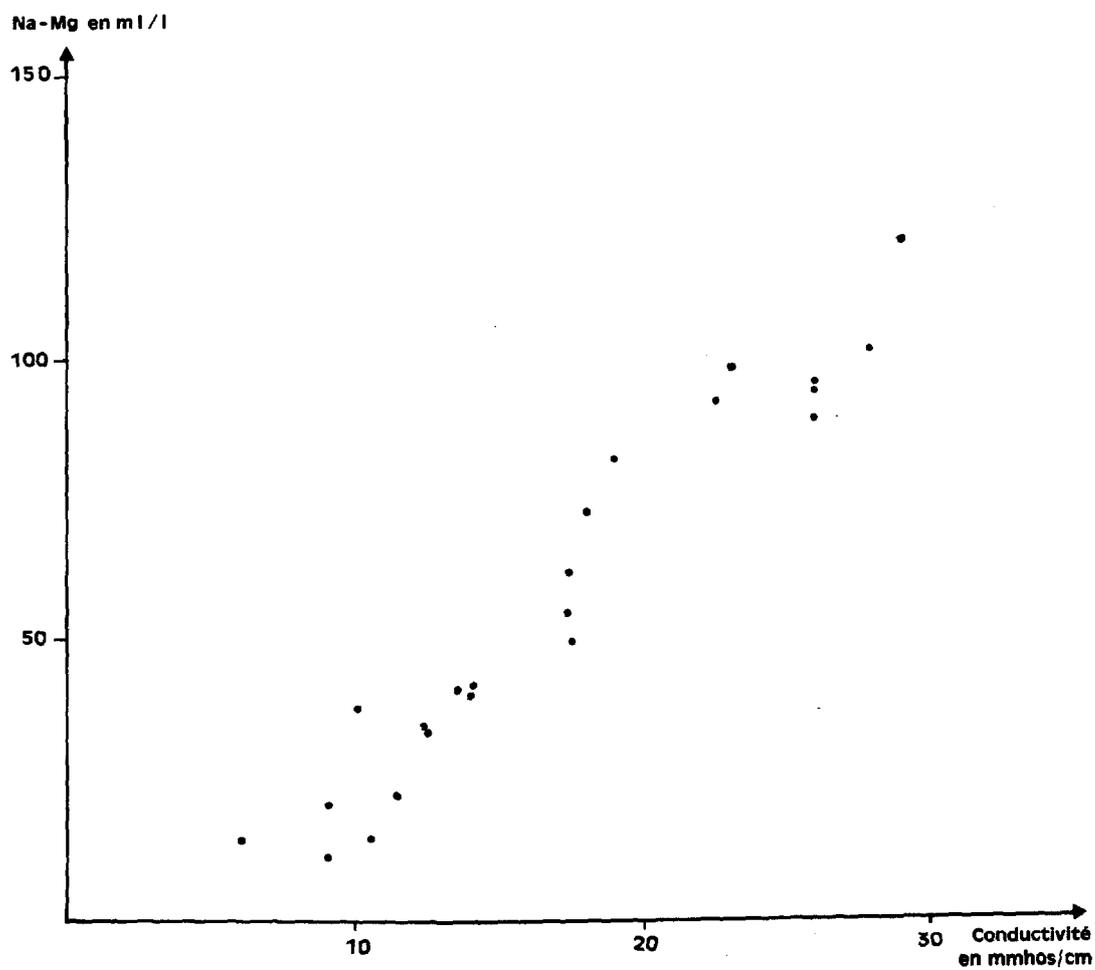


Fig. 1. — Augmentation relative du sodium par rapport au magnésium en fonction de la conductivité.

On observe également un accroissement parallèle des chlorures et du sodium. Parfois un taux nettement inférieur de sodium indique la présence de chlorure de magnésium (Kriz). Dans le cas contraire, il y aurait alors du sulfate de sodium (Zarzis, El Hamadi profil n° 44 page 58).

La teneur en Mg^{++} , presque toujours inférieure à la teneur en Ca^{++} , pour les faibles résidus secs, augmente par la suite avec présence probable de sulfate de magnésium (Gabès et Bou Chemma) qui diminue la solubilité du gypse (effet d'ion commun). Effectivement le calcium ne dépasse que rarement 35 ml/l. Dans la nappe de Kriz, il atteint facilement 40-60 ml/l car à l'inverse, les sulfates de sodium et magnésium étant négligeables, les chlorures de sodium et magnésium augmentent la solubilité du gypse.

Il est possible, comme nous l'avons noté précédemment avec les diagrammes semi-logarithmiques de SCHOELLER, de vérifier si la saturation en gypse est atteinte. Elle se situe à des niveaux variables de gypse dissous en relation avec la force ionique de la solution et la nature des autres sels (nous n'avons pas tenu compte de la température).

On distingue :

a) *Nappes non saturées en gypse*

- Nappes artésiennes.
- Nappes phréatiques du type El Hamadi avec résidu sec élevé et prédominance très nette du chlorure de sodium sur les sulfates de sodium et magnésium.

b) *Nappes saturées en gypse*

- Nappes peu salées avec faible teneur en chlorures et en autres sulfates. Type du profil n° 80 de Djerba et Souf (Algérie).
- Nappes salées à très salées avec teneur élevée en chlorures de sodium et sulfates de magnésium et sodium. Type de Gabès, Bou Chemma, Nefta.
- Nappes salées à très salées avec teneur très élevée en chlorures de sodium et magnésium. Type de Kriz.

En définitive, ces quelques exemples montrent une assez grande diversité de la composition chimique des nappes phréatiques dans le Sud-Tunisien en même temps que leur liaison étroite existant avec les eaux originelles (sources, émergences, forages). Les nappes phréatiques vont donner à leur tour un type de salure bien spécifique aux solutions du sol. Ce dernier intervient également dans une large mesure, comme nous allons le montrer, pour favoriser ou non l'action des nappes salées, le plus souvent saturées en gypse, dans la formation des croûtes et encroûtements gypseux.

3 - DESCRIPTION DE QUELQUES PROFILS A CROÛTE OU ENCROÛTEMENT GYPSEUX DE NAPPE

Nous envisagerons successivement :

- Les croûtes et encroûtements anciens de nappe.
- Les croûtes et encroûtements actuels affectant les horizons de surface.
- Les croûtes et encroûtements actuels affectant les horizons de profondeur.

3.1 - CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS ANCIENS

3.1.1 - Non soumis à l'action d'une nappe phréatique actuelle

Depuis le début du Quaternaire, les niveaux statiques des grands appareils artésiens ayant baissé de plusieurs mètres, il n'y a aucune surprise à trouver d'anciennes formations gypseuses de nappe en des lieux maintenant topographiquement surélevés par rapport aux niveaux actuels des nappes. COQUE (1962) cite plusieurs exemples dont deux encroûtements gypseux de nappe étudiés par DESSUS dans la région de Douz. Ils se localisent dans les zones d'artésianisme actuel avec extension marginale supplémentaire correspondant aux anciens niveaux statiques.

Exemple d'El Mdou (6 km au sud-ouest de Gabès)

Cette localité se trouve à la limite ouest de l'aire d'artésianisme de la nappe de Gabès. Ainsi le niveau statique de la source et du forage actuel se situe sensiblement à hauteur de la route de Matmata-Gabès.

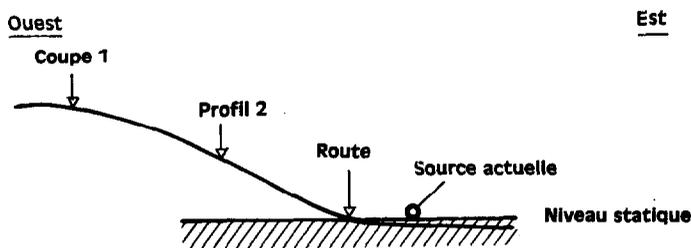


FIG. 2.

Par contre, 2 km à l'ouest, en amont de l'oued Melah, et à une cote de plusieurs mètres supérieure à la route, on retrouve un ancien niveau de sources entaillé par l'oued.

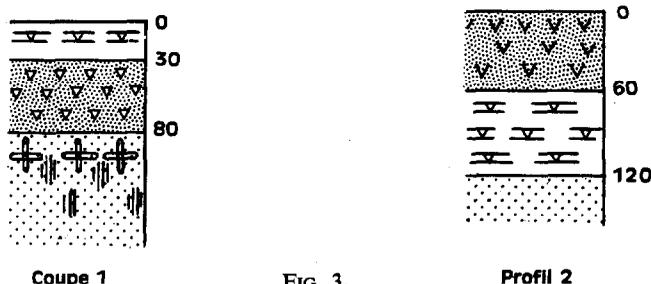


FIG. 3.

Symboles utilisés pour la représentation des profils :

- ∨ Horizon gypseux.
- ∇ Amas gypseux.
- ≡ Croûte ou encroûtement gypseux.
- ⊕ Cristaux de gypse type « rose de sable ».
- ||| Pseudogley.
- || Gley.

La coupe 1 montre un horizon de gypse blanc pulvérulent avec, en surface, les plaques de croûte gypseuse et un début de polygonation : « sol calcimorphe gypseux » (1). Au-dessous, un horizon noir très induré bourré d'amas gypseux surmonté un niveau sableux hydromorphe avec racines gypsifiées et quelques petites roses de sable.

Le profil 2, est situé non loin de la route de Gabès sur un niveau intermédiaire entre les deux sources :

- 0 - 60 cm Sable fin gypseux, meuble
- 60 - 120 cm Croûte ancienne de nappe, jaune brun pâle, très indurée et finement microcristallisée
- > 120 cm Sable fin non gypseux sec. (Nappe à plusieurs mètres de profondeur).

Latéralement, au bord de l'oued, la croûte ancienne de nappe évolue en « sol calcimorphe » dès qu'elle est mise à découvert.

En l'absence de nappe phréatique actuelle susceptible d'intervenir, l'exemple d'El Mdou permet d'entrevoir deux devenir possibles des formations anciennes :

- soit une évolution vers un sol de type calcimorphe,
- soit une fossilisation de l'horizon gypseux.

Dans le premier cas, la croûte ou l'encroûtement ont servi de roche-mère à la formation des croûtes et encroûtements gypseux de surface (BUREAU, ROEDERER, 1961). Au cours des prospections dans le Sud-Tunisien, nous avons eu l'occasion d'en voir un très grand nombre :

- Encroûtement gypseux de la basse terrasse de l'oued Akarit (POUGET, 1965a).
- Encroûtement gypseux du vaste plateau au nord de Gabès entre les oasis Rhenouche, Bou Chemma et le Djebel Dissa (SOURDAT, 1960 ; POUGET, 1965a).
- Encroûtement gypseux en bordure des oueds de la Jeffara (oued El Ferdj, oued Morra, etc.).
- Encroûtement gypseux des dépressions fermées au sud d'une ligne Médinine-Ben Gardanne (Bir El Magroun, Bir Garaet Tsméd, Bir Darhsen, etc.). A Bir Darhsen, l'encroûtement est de couleur cendreuse blanchâtre avec en profondeur une succession de strates grises (gley ancien) sablo-gypseuses.

Morphologiquement, les croûtes et encroûtements anciens présentent deux faciès principaux :

- jaune-brun pâle, sablo-gypseux, finement microcristallisé,
- blanchâtre à cendreuse avec nombreux petits amas gypseux (zones hydromorphes des anciennes sources).

L'évolution est la même avec formation en surface d'un horizon de gypse pulvérulent blanc sur 30 à 40 cm (encroûtement) surmonté parfois par la croûte discontinue en plaques polygonales très typiques.

Dans le second cas, la présence d'un horizon de recouvrement n'a pas permis une évolution analogue. Il y a alors fossilisation de la croûte ou encroûtement généralement très induré, sablo-gypseux, finement microcristallisé avec souvent une structure à tendance lamellaire :

(1) Jusqu'à présent, ce type de sol était classé dans la classe des sols calcomagnésimorphes. Au paragraphe V, nous proposerons de l'intégrer dans la classe des sols halomorphes.

— Croûte et encroûtement gypseux au nord-ouest de l'île de Djerba dans deux dépressions jadis en relation avec la mer. La nappe actuellement à 3 - 5 m de profondeur entretient une certaine humidité (POUGET, 1967b).

— Horizon gypseux très induré, souvent grossièrement cristallisé sous l'encroûtement nodulaire calcaire (« Archa ») dans la région de Zarzis et d'Adjim.

— Encroûtement gypseux à la base des « limons à nodules calcaires » (POUGET, 1965a).

— Croûte gypseuse très épaisse et indurée dans l'oasis de Rhenouche avec un plan d'eau actuel à plus de 3 - 4 m.

— A Douz, de tels exemples sont fréquents (DESSUS, 1947).

Citons le *profil n° 1 à El Ahsai* (POUGET, 1967c) 500 m au nord du périmètre d'El Ahsai à 6 km au sud de Douz.

Végétation en touffes clairsemées de : *Plantago albicans*, *Arthrophytum schmittianum*, *Euphorbia guyoniana*.

En surface, gypse en petits cristaux lenticulaires et racines gypsifiées.

Topographie sensiblement plane :

- 0 - 30 cm 10 YR 8/4 beige-clair, sablo-gypseux, meuble avec petites poupées gypseuses de 1 cm de diamètre, radicules, sec.
- 30 - 70 cm Beige-clair, sablo-gypseux, présence de lits irréguliers de 1 cm d'épaisseur de gypse finement cristallisé, racines peu nombreuses, frais.
- 70 - 100 cm *Encroûtement gypseux*, beige-clair, sablo-gypseux, consistant, porosité faible, racines très peu nombreuses.
- 100 - 170 cm Beige-foncé, 10 YR 7/6, sableux, non gypseux, particulière, meuble, frais à humide vers la partie inférieure. De 100 à 110 cm, petites racines gypsifiées, avec roses de sable.

Nappe profonde à plus de 2,5 - 3 m.

Profondeur en cm	Calcaire total %	Gypse % (1) CaSO ₄ 2H ₂ O	Conductivité extrait de saturation en m · mhos/cm
0 - 30	1,1	32,5	3,0
30 - 70	3,5	30,1	3,2
70 - 100	3,1	34,7	3,4
100 - 170	2,7	traces	5,4

— Dans les zones hautes de l'oasis d'Oum Soumaa (presqu'île de Kébili) on note une croûte gypseuse très indurée (POUGET, 1966a).

(1) Le gypse dosé par la méthode gravimétrique (précipitation des sulfates par le chlorure de baryum) est exprimé en % de terre séchée à l'air.

Ainsi le profil 87 oasis d'Oum Soumaa

- 0 - 30 cm Brun-clair, sablo-gypseux, particulière, radicelles.
- 30 - 70 cm Jaune-brun, sablo-gypseux, très nombreuses racines de palmiers.
- 70 - 80 cm Horizon de racines de palmiers.
- > 80 cm Croûte gypseuse, jaune-brun, sablo-gypseux, très induré, massif, finement microcristallisé, quelques rares petits amas gypseux. Nappe à plus de 3 m de profondeur.

— Parfois cette croûte affleure en surface sans qu'il y ait évolution vers un sol calcimorphe. Ainsi, directement au sud d'El Hamma de Gabès, la terrasse ancienne de l'oued présente une croûte ancienne extrêmement indurée, finement microcristallisée, épaisse, avec en surface, une végétation typique de *Frankenia thymifolia*, également *Astragalus armatus*, *Lygeum spartum*, et *Limoniastrum guyonianum* (sur les micronebkhas sableuses) : profil 15 (POUGET, 1966d). L'érosion éolienne a déblayé l'horizon surmontant la croûte.

Par contre, de l'autre côté de l'oued, dans la palmeraie d'El Hamma M'Zira, un dépôt sableux recouvre la croûte avec en profondeur la présence d'une nappe phréatique actuelle liée aux irrigations et aux émergences artésiennes (faille d'El Hamma) qui assurent d'ailleurs un débit pérenne à l'oued El Hamma.

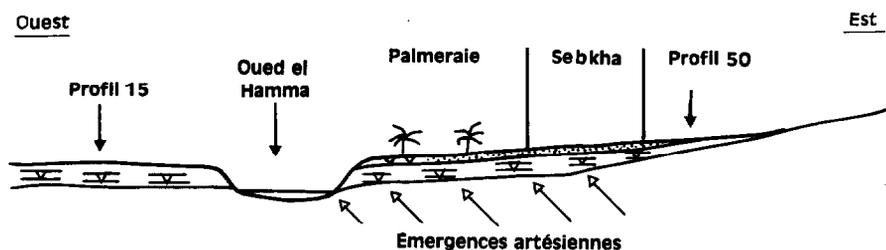


Fig. 4. — Coupe de la palmeraie d'El Hamma M'Zira

A l'ouest de la palmeraie, en remontant le glacis en direction du Djebel Aziza, une zone surélevée de sols halomorphes (Sebkha) atteste la présence d'émergences artésiennes responsables de la salure et de l'humidité permanente que l'on y observe. Le profil 50 (croûte gypseuse ancienne très indurée à 30 cm de profondeur avec végétation de *Frankenia thymifolia*) témoigne d'autre part d'un niveau statique jadis plus élevé. (fig. 4)

3.1.2 - Soumis à l'action d'une nappe phréatique actuelle

Comme les formations gypseuses anciennes de nappe, les oasis se localisent pour leur grande majorité dans les régions d'artésianisme. Elles se trouvent donc souvent soumises à l'action d'une nappe phréatique actuelle plus ou moins profonde.

Les oasis de Gabès-Nord et leurs extensions (POUGET, 1966c) fournissent un très grand nombre d'exemples de croûte gypseuse très indurée, massive, finement microcristallisée de couleur brun très pâle (10 YR 7/4) à l'état humide et blanchâtre (10 YR 8/3) à l'état sec.

Ainsi, le profil n° 12 bis à Bou Chemma à proximité immédiate de l'oasis.

Végétation : *Frankenia thymifolia*, *Aeloropus littoralis*, *Limonium tunetanus*, *Plantago crassissifolia*.

- 0 - 15 cm Beige-clair, sablo-gypseux, particulaire, petits amas gypseux, racielles, frais.
- 15 - 16 cm Petite croûte gypseuse rubanée très dure.
- 16 - 50 cm Croûte gypseuse brun très pâle (10 YR 7/4 humide), fortement indurée, gypse très finement microcristallisé, saccharoïde, petits amas gypseux friables blanchâtres ; horizon massif, sans racines, humide.
- 50 - 70 cm Même horizon, légèrement moins consistant, humide.
- 70 - 170 cm Croûte gypseuse, sablo-gypseux, induré, très humide, pas de traces d'hydromorphie. Nappe à 170 cm (résidu sec 9 g/l).

Profondeur en cm	Calcaire total %	Gypse %	Conductivité extrait de saturation en m · mhos/cm
0 - 15	2,4	38,4	18,5
15 - 70	0,0	59,5	15,0
70 - 170	2,2	46,8	5,5

L'influence de la nappe se manifeste par la salure élevée des horizons de surface et la présence de petits amas gypseux friables occupant les espaces restreints laissés disponibles. Le taux de gypse est plus élevé dans l'horizon supérieur de la croûte alors qu'elle n'est pas ou très peu calcaire (le calcaire ne peut donc jouer le rôle de ciment).

La croûte s'est formée et évoluée sur un sable gypseux d'origine éolienne. On retrouve d'ailleurs très souvent ce dépôt sablo-gypseux en bordure et à proximité des Chotts (Kébili, Douz, El Hamma, Rhenouche, etc.). Il se dispose suivant des lanières, orientées NE-SW, dont il ne subsiste que des buttes témoins fossilisées par un sol de type calcimorphe.

Dans l'oasis de Rhenouche en bordure de la voie ferrée on note la coupe d'une telle butte :

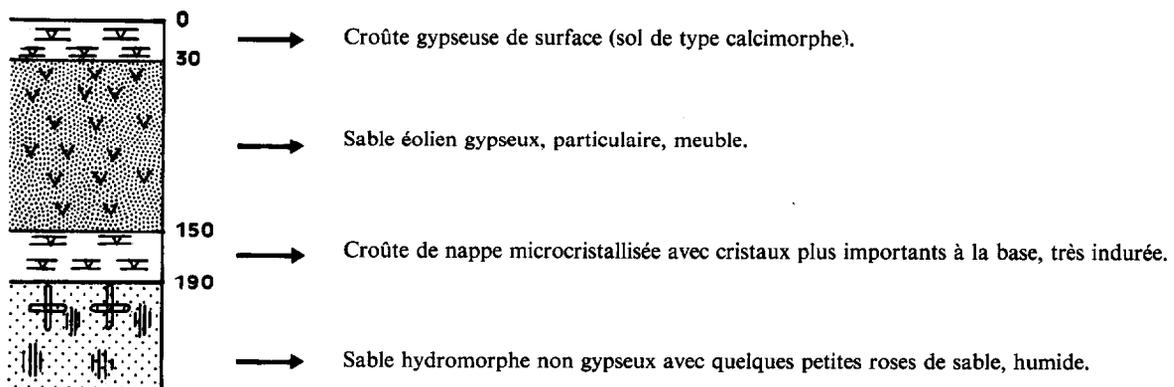


Fig. 5. — Profil dans une butte témoin fossilisée (oasis de Rhenouche).

Profondeur en cm	Calcaire total %	Gypse %	Conductivité extrait de saturation en m · mhos/cm
0 - 30	3,2	44,8	4,3
30 - 150	0,8	48,7	3,9
150 - 190	12,0	43,7	5,1
> 190	0,0	traces	3,7

Ainsi, il semble que la base du dépôt éolien sablo-gypseux se soit transformée sous l'action d'une nappe en croûte gypseuse.

Dans le Nefzaoua, une série d'observations similaires montrent qu'effectivement on retrouve ce fait. Le dépôt éolien se présente dans la presqu'île de Kébili comme un glacis maintenant disséqué par l'érosion : c'est le glacis II (COQUE, 1962) avec en surface une croûte gypseuse. La texture est variable (gypse lenticulaire plus ou moins grossier) avec souvent une stratification entrecroisée. En bordure sud dans le Chott Djerid on le retrouve en buttes témoins de 4 - 5 m très érodées (paysage ruiniforme).

Enfin, à Douz et dans les zones au sud du Chott, ce sont des dunes de sable gypseux dont la surface est maintenue indurée par une croûte gypseuse.

Profil n° 63 oasis d'Oum Soumaa (presqu'île de Kébili).

La croûte gypseuse de nappe très épaisse à texture sableuse repose sur un horizon souvent hydro-morphe sablo-argileux non gypseux avec petites roses de sable (POUGET, 1966a) (fig. 6).

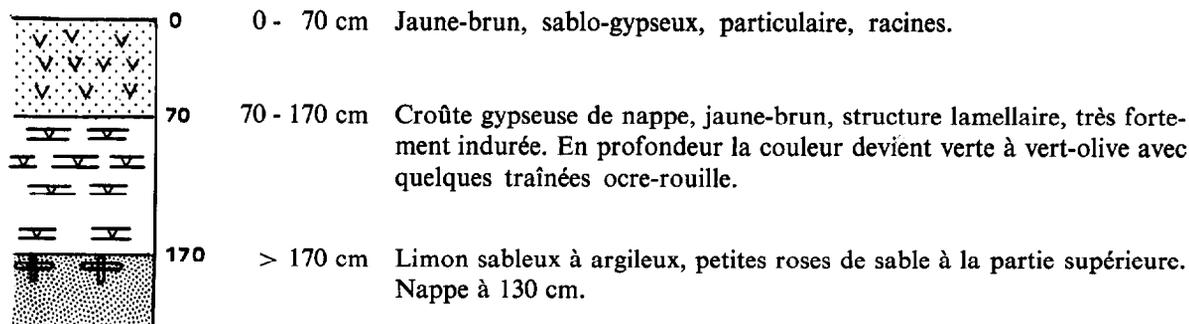


Fig. 6. — Profil dans l'oasis Soumaa.

Profondeur en cm	Gypse %	Conductivité extrait de saturation en m · mhos/cm
70 - 90	52,0	15,0
90 - 110	50,2	11,0
110 - 130	49,7	9,5
130 - 150	47,7	9,5
150 - 170	46,7	13,5
> 170	2,6	16,0

Dans la croûte le taux de gypse augmente du bas vers le haut de même que la conductivité.

Parfois (*Profil n° 32 Oum Soumaa*), il est typique de voir une croûte gypseuse à structure feuilletée (sable éolien à structure entrecroisée) avec entre les feuillets des amas gypseux blancs friables de néoformation. Ils peuvent parfois être très cristallisés et former des filons extrêmement durs (*Profil n° 81 Oum Soumaa*).

En conclusion, les croûtes et encroûtements anciens de nappe, fréquents dans le sud, se localisent dans les zones d'artésianisme, en bordure de certains oueds, et d'une façon générale à proximité immédiate de toute arrivée d'eau souterraine plus ou moins salée. Partout où le niveau statique s'est abaissé, ils subsistent, parfois fortement érodés, et évoluent différemment selon les nouvelles conditions dans lesquelles ils se sont trouvés. Là où la nappe phréatique est encore présente, ils continuent à évoluer. Il semble que la présence d'un dépôt éolien sablo-gypseux ait facilité leur formation. Les croûtes et encroûtements sont alors souvent très épais, à texture sableuse, finement microcristallisés et très indurés. L'analyse des minéraux lourds confirme l'origine éolienne du dépôt.

3.2 - CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS ACTUELS SE FORMANT DANS LES HORIZONS DE SURFACE

La nappe phréatique suffisamment proche de la surface permet une remontée capillaire des solutions salines et entraîne un dépôt de gypse dans les horizons supérieurs du sol.

Nous envisageons d'abord le cas d'un dépôt peu important se produisant sous forme d'amas gypseux pour décrire ensuite quelques exemples de croûtes ou encroûtements.

3.2.1 - Amas gypseux

Profil n° 79 dans l'île de Djerba (POUGET, 1967b).

Zone basse hydromorphe en bordure de la mer entre Sidi-Mahrez et le phare de Tourgueness.

Végétation assez abondante avec : *Juncus maritimus*, *Aeloropus littoralis*, *Plantago crassissifolia*, *Zygophyllum album*, Palmiers.

Efflorescences de sels en surface avec croûte saline.

- 0 - 10 cm Brun-jaune, 10 YR 5/4, irrégulier car présence de lits plus ou moins colorés en brun foncé ; très nombreux amas gypseux blanchâtres pulvérulents « farineux ».
- 10 - 30 cm Brun pâle, 10 YR 7/4, sableux particulière, très fins amas gypseux peu visibles, gaine brune autour des nombreuses radicelles, frais.
- 30 - 50 cm Brun plus pâle, 10 YR 7/3, sableux assez grossier, particulière avec petits blocs indurés, racines moins nombreuses avec gaine brune, frais à humide.
- 50 - 80 cm Blanchâtre, 10 YR 7/2, sableux grossier, induré en blocs consolidés.
- 80 - 100 cm Même horizon avec apparition de taches réduites.
- > 100 cm Gley gris, 10 YR 6/1, sableux un peu argileux, induré.

— Nappe phréatique à 97 cm, le 19 février 1966.

— Nappe phréatique à 124 cm, le 22 mai 1967.

Prélèvement Date	Résidu sec g/l	Conductivité m · mhos/cm	mé/litre						pH
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃	
19-2-66	15,44	18	42	50	151	154	73,3	5,8	8,2
22-5-67	25,00	30	42	86	235	268	97,0	6,1	

Profondeur (cm)	Granulométrie					pH 1/2,5	CO ₃ Ca (%)	Gypse (%)	Mat. Org. (%)	Sat. de la pâte (%)	Conduc- tivité (m · mhos /cm)	Sels solubles Extrait de saturation (mé/l)				
	A	L	STF	SF	SG							Cl	CO ₃ H	Ca	Mg	Na
0- 10	11,0	10,0	18	39	18	8,8	16,7	47,1	1,03	31,2	102,0	1 246	1,8	64,0	371,0	1 286,2
10- 30	5,5	0,5	3	38	51	8,6	32,2	21,8	0,36	28,4	12,7	72,8	1,4	35,5	26,0	93,2
30- 50	3,0	0,0	2	49	44	8,3	39,2	5,2	0,36	29,2	9,3	51,6	1,0	33,0	26,5	62,6
50- 80	2,0	0,0	1	39	57	8,8	45,8	0,6	0,15	26,8	10,5	72,8	1,3	29,5	23,5	91,6
80-100	2,5	0,0	2	55	38	8,9	45,8	1,2	0,05	26,8	15,0	116,0	1,5	30,5	34,0	126,3

Un horizon très salé et enrichi en amas gypseux se forme en surface. La nappe peu profonde même en été assure une remontée capillaire des solutions salines à travers les horizons sableux (sable dunaire calcaire non gypseux). Elle est saturée en sulfates et présente une composition chimique très différente de celle de la mer pourtant très proche à 200 m.

On observe des profils analogues dans des sols sableux et gypseux : Profil n° 135 oasis de Gabès, 9 et 10 oasis d'oued Zira à Kébili. La présence d'un gley bien développé en profondeur caractérise ce type de sol que l'on rencontre dans les zones hydromorphes en aval des oasis anciennes.

La végétation le plus souvent à dominance de *Juncus maritimus*, *Aeloropus littoralis* et *Arthrocnemum* indique d'autre part une nappe salée peu profonde.

Dans l'horizon de surface, le taux de matières organiques est relativement élevé en relation avec une forte concentration de radicules. L'analyse des composés humiques montre une prédominance importante des acides fulviques (1,60 ‰ dans l'horizon 0 - 10 cm) sur les acides humiques (0,17 ‰). L'activité radiculaire contribue à favoriser la concentration des solutions du sol et donc le dépôt de gypse à ce niveau. Il est possible qu'il y ait aussi une précipitation biologique du gypse en relation avec le gaz carbonique libéré par la respiration des racines. Une dissolution de calcaire entraîne la présence d'ions HCO₃⁻ et Ca⁺⁺. Ce dernier en excès dans une solution déjà saturée en sulfate de calcium, provoque une précipitation du gypse.

Il arrive que cet horizon d'amas gypseux soit recouvert par un voile sableux éolien récent : à Bechri dans la presque île de Kébili et peut-être aussi certains profils de la parcelle du Cruesi à Tozeur.

D'autre part, dans les zones très salées (Sebkhas) où la végétation est peu abondante à dominance d'*Arthrocnemum*, on trouve très fréquemment à 5 - 15 cm de profondeur, un horizon peu épais (5 - 10 cm) ou une succession de filonnets de gypse cristallisé, blanc, lenticulaire ou en petits prismes monocliniques (l'ensemble est analogue à du gros sel de cuisine). Parfois, les cristaux se soudent entre eux pour former une croûte cristallisée.

3.2.2 - Croûtes et encroûtements

Nous décrirons deux profils caractéristiques, l'un à Kriz (Tozeur) et l'autre à Oum Soumaa (Presqu'île de Kébili).

Profil n° 9 bis à Kriz (POUGET, 1966b)

Zone salée formant une légère cuvette en bordure aval de l'oasis de Kriz. Topographie sensiblement plane s'abaissant régulièrement en direction du Chott Djérid.

Végétation : *Juncus maritimus*, *Arthrocnemum*, *Aeloropus littoralis*.

- 0 - 6 cm Croûte saline sur les micro-reliefs créés par les touffes de végétation, pellicule limoneuse de 0,5 cm dans les micro-dépressions et horizon noir de sulfures avec filets grisâtres très fins (1 à 2 mm) horizontaux. 2,5 Y 7/2 (sec) jaune-gris, limono-sableux, particulaire, peu poreux, consistance et cohésion faibles, racines et radicales, humide.
- 6 - 18 cm Gris beige-clair 2,5 Y 8/2 (sec), limono-sableux, particulaire, porosité faible, consistance et cohésion faibles, présence de minces filets rouille en festons, racines, humide.
- 18 - 30 cm Brun pâle 10 YR 8/4 (sec) limono-sableux, très nombreux *amas gypseux* blanchâtres « farineux » friables ; porosité tubulaire moyenne, consistance et cohésion faibles, racines, humide.
- 30 - 45 cm *Croûte gypseuse de nappe*, brun pâle avec à la base plages noirâtres ferrugineuses. 10 YR 8/3 (sec) sableux, structure « feuilletée », pores assez nombreux (1 à 3 mm de diamètre), consistance et cohésion élevées, pas de racines, humide.
- 45 - 60 cm Jaune-beige, 10 YR 8/4 (sec) avec traînées ocre à noires et concrétions ferrugineuses de 1 cm de diamètre ; sableux, particulaire, meuble ; pas de racines, très humide. Limite nette avec l'horizon supérieur.
- 60 - 90 cm Jaune-beige clair avec traînées noires à bords nets ou flous de plusieurs centimètres carrés, plus nombreuses à la base ; 10 YR 7/3 (sec) pour l'horizon, 10 YR 3/4 à 10 YR 2/2 pour les traînées, sableux, structure particulaire, meuble, pas de racines, très humide.
- 90 - 115 cm *Pseudogley*, jaune-beige, vert, ocre et gris 10 YR 6/3 (sec) sableux, structure particulaire meuble, très humide.
- > 115 cm *Gley*, texture hétérogène avec passage sablo-argileux (5 Y 7/1 sec) très humide dans lequel on trouve des *poteries* (romaines ou plus récentes), des coquilles de petits gastéropodes et des amas gypseux de 3 à 5 mm de diamètre.
Passage sableux très humide (2,5 Y 7/2 sec).

— Nappe à 112 cm, le 7 juillet 1964.

— Nappe à 65 cm, le 17 février 1965.

Date du prélèvement	Résidu sec en g/l	Conductivité m · mhos/cm	mé/litre					
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
7-7-64	19,22	25,3	60	66	200	248	61	4
17-2-65	20,64		63	61	216	251	81	7

Profondeur (cm)	Granulométrie					pH 1/2,5	Calcaire (%)	Gypse (%)	Mat. Org. (%)	Conductivité (m · mhos/cm)	Sels solubles Extrait de saturation (mé/l)						Fe ₂ O ₃ (%)	
	A	L	STF	SF	SG						Cl	CO ₃ H	SO ₄	Ca	Mg	Na	libre	total
0- 6	10,0	25,0	29	25	6	8,45	10,4	48,0	1,80	108,0	1282	2,4	147,6	96,0	448,5	888,1	0,45	1,10
6- 18	9,0	25,5	27	28	5	8,20	8,3	60,5	0,88	91,0	1078	1,2	120,1	100,0	316,5	807,2	0,30	0,60
18- 30	5,5	40,5	37	12	3	8,05	10,0	59,0	0,98	40,0	400	1,8	73,8	83,5	77,5	388,4	0,30	0,60
30- 45	9,0	6,5	2	34	48	8,10	16,2	44,0	0,40	22,3	190	1,4	68,6	57,5	46,5	156,7	0,15	0,40
45- 60	8,5	18,5	11	27	33	8,10	21,2	13,5	0,08	22,3	180	1,4	63,5	57,0	45,0	151,9	0,25	0,50
60- 90	11,5	1,0	1	38	46	8,10	17,9	9,0	0,10	20,6	172	1,8	63,0	56,0	45,5	143,7		
90-115	8,0	6,0	3	38	41	8,05	18,3	16,5	0,08	19,2	155	1,5	66,9	54,0	37,5	131,1	0,50	0,80
>115	16,0	18,0	17	24	20	8,00	14,1	29,0	0,47	22,3	190	1,3	81,5	61,0	47,0	148,9	0,25	0,80
>115 (sable)	8,0	1,5	2	42	44	8,10	17,9	13,0	0,10	22,3	190	1,3	70,4	60,0	47,0	156,4	0,30	0,60

L'horizon d'amas gypseux (18-30 cm) surmonte une véritable croûte de nappe peu épaisse mais consistante et compacte (30-45 cm). De 0 à 18 cm, la présence de sulfures, la teneur en gypse et la salure élevée caractérisent les horizons de surface.

Il est remarquable de noter les poteries trouvées en profondeur attestant un âge récent pour ce type de croûte. La nappe, très salée, reste à faible profondeur même en été où elle se trouve au niveau du gley. Dans le pseudogley, on observe une couleur nettement verte, intermédiaire entre les couleurs gris et rouille, il s'agirait peut-être de sulfate et chlorure ferreux.

Profil n° 92 à Oum Soumaa (POUGET, 1966a)

Zone basse en bordure aval de la palmeraie d'Oum Soumaa.

Plantation de jeunes palmiers.

Végétation : *Juncus maritimus*, *Aeloropus littoralis*, *Arthrocnemum*, *Limonium tunetanum*.

En surface, croûte saline.

- 0 - 5 cm Horizon brun marron à noir, riche en sulfures, sablo-limoneux avec radicelles entourées d'une gaine rouille.
- 5 - 22 cm Beige-olive clair, 10 YR 8/3 (sec), finement sablo-limoneux, peu consistant, radicelles avec gaine rouille.
- 22 - 40 cm Beige clair olive, 10 YR 8/2 (sec), sablo-limoneux, assez consistant, nombreux pores avec l'intérieur de couleur rouille, *amas gypseux* blanc « farineux » très finement microcristallisés, frais.
- 40 - 55 cm Beige-olive 2,5 Y 8/2 (sec).
Croûte gypseuse de nappe structure à tendance « feuilletée », très consistante, pores très fins, radicelles peu nombreuses, limite nette avec l'horizon inférieur.
- 55 - 70 cm Jaune-brun pâle, 10 YR 8/4 (sec) sablo-gypseux avec traînées floues noirâtres, meuble, pas de racines, humide.
- 70 - 100 cm Jaune-brun pâle devenant gris très clair, 10 YR 8/3 (sec), sablo-limoneux gypseux, très humide.

- Nappe à 40 cm, le 4 mars 1965.
- Nappe à 70 cm, le 8 octobre 1965.

Date du prélèvement	Résidu sec en g/l	Conductivité m · mhos/cm	mé/litre					
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
4- 3-65	9,45	11,5						
8-10-65	9,36	11,8	36	44	66	66	72	5,7

Profondeur en cm	Calcaire %	Gypse %	Conductivité Extrait saturé en m · mhos/cm
5 - 22	5,6	54,9	31,5
22 - 40	3,0	67,3	10,0
40 - 55	2,2	65,6	7,1
55 - 70	1,1	56,7	6,2
70 - 100	2,6	55,8	7,8

Ici aussi un horizon avec amas gypseux surmonte la croûte peu épaisse. Par contre, le sol évolue sur un sable très gypseux (55 %) d'origine éolienne. L'accumulation de gypse est relativement moins importante que dans le profil précédent où l'on passe de 15 à 60 % de gypse dans la croûte. La nappe, moins salée, reste malgré cela saturée en gypse avec une composition chimique différente : présence de sulfate de magnésium et non chlorure de magnésium.

En définitive, il semble que ces types de profil à amas et croûtes à faible profondeur caractérisent les zones où la nappe demeure en permanence proche de la surface : zones en aval des oasis anciennes (Kriz, Kébili, El Hamma de Gabès, etc.), bas-fonds de vallées d'oued. En hiver, on observe très souvent une submersion ou tout au moins un engorgement des horizons de surface permettant le développement à cette époque des joncs (*Juncus maritimus*) qui fructifient (NOVIKOFF, 1961) alors que l'*Arthrocnemum* présente un aspect rougeâtre. Dès que le sol se ressuie, l'*Arthrocnemum* reprend une couleur normale, fleurit et fructifie en été.

3.3 - CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS ACTUELS SE FORMANT DANS LES HORIZONS DE PROFONDEUR

Comme précédemment, nous envisageons le dépôt de gypse en amas et nodules avant d'étudier les croûtes et encroûtements eux-mêmes.

3.3.1 - Amas et nodules gypseux

La nappe phréatique est toujours profonde et à plus de 2 m.

Profil n° 186 oasis de Gabès (POUGET, 1965c)

Zone haute bien drainée. Très nombreux palmiers, abricotiers, pêcheurs et grenadiers.

- 0 - 35 cm Jaune-brun à brun-foncé, finement sableux, assez meuble, très nombreux petits amas blancs gypseux (amas « têtes d'épingles »), racines et radicelles.
- 35 - 45 cm Même horizon brun-foncé, finement sableux avec amas gypseux blancs farineux (diamètre 1 à 2 mm) et très fin pseudomycélium blanc sur la paroi des pores tubulaires.
- 45 - 100 cm Jaune-brun-beige devenant clair, finement sableux, assez consistant, très nombreux nodules farineux blancs (1 à 5 cm de diamètre) avec anastomoses paraissant phagocyter le sol environnant (ceci est encore plus visible dans les profils plus humides, les nodules sont alors laiteux). Amas plus grossièrement cristallisés blanc-jaunâtres tapissant la paroi des pores tubulaires, les racines de palmiers commencent à être concrétionnées.

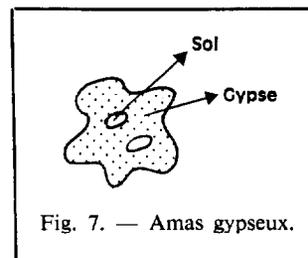


Fig. 7. — Amas gypseux.

- 100 - 160 cm Jaune-marron, bariolé de beige, finement sableux, consistant et peu poreux ; racines encore vivantes, très nettement entourées d'une gaine gris-vert cristallisée gypseuse ; débris de poteries.

— Nappe à plus de 2,50 m.

Profil n° 157 oasis de Mansoura (POUGET, 1966a)

Zone haute de la vieille oasis de Tembib avec oliviers, abricotiers, palmiers.

- 0 - 40 cm Brun, sablo-argileux, structure à éléments polyédriques émoussés, radicelles et racines.
- 40 - 80 cm Brun-clair, sablo-argileux, racines.
- 80 - 140 cm Brun-jaune, sablo-limoneux, avec très nombreux amas gypseux, certains sont durcis, donnant l'impression d'un horizon graveleux, porosité tubulaire, peu consistant, racines de palmiers très nombreuses avec parfois *gaine de gypse* (simple feu-trage blanc ou manchon plus cristallisé).
- > 140 cm Même horizon mais consistance plus élevée, racines moins nombreuses.
- Nappe à plus de 2,50 m.

Ces deux profils sont typiques des zones hautes bien drainées naturellement dans les oasis anciennes. Il est fréquent de voir des amas et nodules gypseux dès que le sol se dessèche dans les horizons de surface. En profondeur, au niveau de l'enracinement du palmier se forme un véritable horizon d'amas gypseux plus ou moins cristallisés avec les classiques racines gypsifiées décrites par de nombreux auteurs (DESSUS, DURAND, 1959).

Parfois, une différence de texture favorise la formation d'amas gypseux ovoïdes (1 à 5 mm de diamètre) dans les horizons à texture plus fine sablo-argileuse. C'est le cas de certains profils dans les oasis d'Oudref et Mareth où de tels horizons alternent avec des horizons sableux.

Enfin, l'irrigation avec une eau très salée et riche en sulfates (résidu sec de 4 à 7 g/l) entraîne une précipitation de gypse en fins amas dans les pores, immédiatement au-dessous de l'horizon de labour. Ce phénomène caractérise l'irrigation peu intense avec l'eau des puits de surface dans l'île de Djerba (Profils 571, 602, etc.).

3.3.2 - Croûtes et encroûtements

3.3.2.1. CROUTE GYPSEUSE DANS UN SABLE DUNAIRE GROSSIER

Profil n° 80 dans l'île de Djerba

Zone en bordure de la mer entre Sidi-Mahrez et le phare de Tourgueness. Profil à 400 m du n° 79, plus à l'intérieur.

Topographie vallonnée avec petites dunes littorales colonisées par *Imperata cylindrica*, palmiers.

- 0 - 20 cm Brun pâle, 10 YR 7/4, sable grossier.
 - 20 - 45 cm Brun pâle, 10 YR 6/4, sable grossier, meuble, nombreuses racines d'*Imperata cylindrica*.
 - 45 - 70 cm Jaune-brun pâle, 10 YR 7/4 ; sable grossier, meuble, racines de palmiers.
 - 70 - 90 cm Brun très pâle, 10 YR 7/3, *Croûte gypseuse* de nappe indurée, très finement micro-cristallisée, peu poreuse. Pseudogley. Limite nette avec l'horizon supérieur.
 - 90 - 115 cm Gris-clair, 10 YR 7/2, sablo-limoneux, peu consistant, amas gypseux.
 - 115 - 140 cm Gley, sableux, meuble.
- Nappe à 130 cm, le 18 février 1966.
— Nappe à 140 cm, le 22 mai 1967.

Prélèvement Date	Résidu sec g/l	Conductivité m · mhos/cm	mé/litre						pH
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃	
18-2-66	3,68	4,1	31,6	9,2	14,3	11	40,1	2,4	8
22-5-67	3,50	4,0	31,6	7,6	16,1	13	35,0	3,0	

Le niveau de la nappe paraît constant et surtout sa composition chimique. La saturation en gypse est obtenue malgré un faible résidu sec en l'absence de quantité notable de chlorures. Il est très vraisemblable d'envisager cette zone comme un exutoire de la nappe du calcaire oolithique (Thyrrénien I) formant un alignement de collines plus ou moins ensablées vers l'amont.

Profondeur (cm)	Granulométrie					pH 1/2,5	Calcaire (%)	Gypse (%)	Mat. Org. (%)	Sat. de la pâte (%)	Conduc- tivité (m · mhos /cm)	Sels solubles Extrait de saturation (mé/l)				
	A	L	STF	SF	SG							Cl	CO ₃ H	Ca	Mg	Na
0- 20	0,0	0,5	2	40	56	8,9	44,5	0,7	0,47	24,0	1,2	1,6	1,7	5,5	4,0	2,3
20- 45	3,5	0,0	4	48	42	8,5	41,5	0,8	0,26	24,8	0,9	2,4	2,4	3,0	3,0	5,1
45- 70	4,5	0,0	3	40	52	8,4	41,9	0,4	0,26	24,4	1,3	5,0	2,4	4,5	4,5	7,1
70- 90	12,5	8,0	7	24	44	8,3	24,2	40,1	0,15	23,2	4,5	17,0	1,8	35,5	4,5	35,6
90-115	11,5	7,0	7	34	37	8,2	29,2	27,8	0,15	23,6	3,8	9,0	0,9	32,5	4,5	17,4
115-140	9,0	2,5	3	47	39	8,2	38,4	14,6	0,10	27,6	4,1	14,0	1,3	32,0	6,0	21,3

La croûte gypseuse se forme dans un sable grossier très calcaire non gypseux de dune littorale. Avec une texture analogue la remontée capillaire n'est que de 70 cm environ. En effet, les horizons supérieurs (0-70 cm) non salés ne peuvent être affectés par la nappe phréatique. La salure de la croûte reste elle-même faible et il est intéressant de noter une diminution du taux de calcaire total corrélativement à une augmentation du gypse. Peut-être y a-t-il une relation en liaison avec une formation possible de bicarbonates (variation de tension du gaz carbonique) qui en milieu saturé entraîneraient un dépôt de gypse ? Plus simplement sans doute la concentration de la solution du sol au niveau de la frange capillaire est responsable de la précipitation du gypse d'autant que la solution est très riche en sulfates.

3.3.2.2. CROUTE GYPSEUSE DANS UN SOL D'ANCIENNE CULTURE

Profil n° 109 à Mansoura (POUGET, 1966a)

Zone très peu cultivée à l'est de la palmeraie de Telmine.

Palmiers en mauvais état avec *Arthrocnemum* et *Aeloporus littoralis*.

0 - 10 cm Brun, limono-sableux avec débris de poteries.

10 - 50 cm Beige-brun, limono-sableux avec blocs de la croûte sous-jacente, peu consistant, racines de palmiers.

50 - 90 cm Croûte gypseuse de couleur beige-brun à jaunâtre, nombreux petits cristaux de gypse translucides à bords émoussés, gros amas gypseux blancs, faible porosité tubulaire colmatée par le gypse, débris de poteries, racines très rares.

> 90 cm Même horizon mais l'induration diminue en profondeur.

— Nappe à 57 cm, le 21 avril 1965.

— Nappe à 165 cm, le 1^{er} juillet 1965.

Date du prélèvement	Résidu sec en g/l	Conductivité m · mhos/cm	mé/litre					
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
21-4-65	10,38	11,4	38	42	76,8	88	57,4	5,8
1-7-65	15,66	18,2						

Entre l'été et l'hiver la profondeur de la nappe varie beaucoup et la croûte se forme dans un matériau hétérogène légèrement au-dessus du niveau d'hiver. L'induration diminue du haut vers le bas.

Dans les oasis anciennes mal drainées et où les fluctuations de la nappe sont importantes en relation avec des irrigations très faibles en été on rencontre effectivement ce type de profil.

3.3.2.3. ENCROUTEMENT DANS UN HORIZON A TEXTURE FINE

Profils 12 et 70 dans l'oasis d'Oudref (POUGET, 1966c)

Profil n° 70 : Jardins peu cultivés avec palmiers très denses.

Végétation : *Suaeda*.

0 - 40 cm Brun-jaune, sablo-limoneux, meuble, radicelles.

40 - 70 cm Jaune à jaune-brun, bariolé avec pseudogley radiculaire, sablo-limoneux.

70 - 110 cm Horizon bariolé, texture équilibrée, assez consistant et peu poreux, racines peu nombreuses.

> 110 cm *Encroûtement gypseux*, consistant avec amas granuleux plus ou moins cristallisés, beige-blanchâtre à gris-clair, texture équilibrée, très peu de racines.

— Nappe à 167 cm, le 7 décembre 1965.

Profil n° 12 : Zone très peu cultivée, très salée avec végétation d'*Arthrocnemum*.

0 - 20 cm Jaune-brun, sablo-limoneux, meuble, radicelles.

20 - 70 cm Horizon bariolé avec gley radulaire très net, sablo-limoneux, racines de palmiers.

70 - 130 cm *Encroûtement gypseux* brun-clair (7,5 YR 6/4) texture équilibrée avec nombreux amas gypseux et petits filons plus cristallisés ; l'induration, maximum entre 70 et 90 cm, décroît vers le bas ; très peu de racines de palmiers.

— Nappe à 130 cm, le 7 décembre 1965.

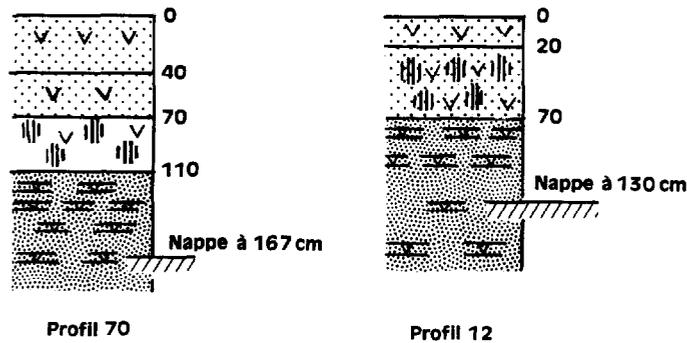


Fig. 8. — Encroûtement dans un horizon à texture fine

L'encroûtement se forme dans un horizon à texture fine à une profondeur différente fonction du niveau de la nappe phréatique. L'induration plus élevée à la partie supérieure de l'encroûtement décroît vers le bas. Une mauvaise perméabilité détermine la formation d'un horizon hydromorphe au-dessus de la zone encroûtée.

3.3.2.4. CROUTE DANS UN ANCIEN ENCROUTEMENT DE SURFACE (type calcimorphe)

Profil n° 13 oasis de Ben Ghilouf (POUGET, 1966d)

Le profil se situe en bordure nord de l'oasis de Ben Ghilouf (à l'ouest d'El Hamma de Gabès).

Zone très salée en aval du périmètre.

Végétation : *Arthrocnemum*, *Frankenia thymifolia*, *Halocnemum strobilaceum*, *Zygophyllum album*.

En surface, horizon poudreux, très salé.

0 - 25 cm Brun, 7,5 YR 5/6, sablo-limoneux, meuble, radicelles, humide.

25 - 50 cm Jaunâtre, 7,5 YR 8/6. *Croûte gypseuse* indurée, texture sablo-limoneuse, présence de fentes verticales en « coin » descendant jusqu'à 80 cm (2 à 5 cm de large) bourrées de gypse limoneux blanc.

Petite croûte zonée de 1 cm d'épaisseur, très dure, à la partie supérieure de l'horizon.

- 50 - 80 cm Brun pâle, 7,5 YR 7/6, sable grossier gypseux, particulière, très humide, racines.
 80 - 120 cm Brun pâle, 7,5 YR 6/6, même horizon sablo-gypseux, très humide.

— Nappe à 116 cm, le 12 janvier 1966.

A proximité immédiate, se trouve une butte de sable gypseux cuirassée par une croûte et encroûtement gypseux de surface (sol de type calcimorphe) avec le classique réseau de polygones qui s'enracinent en profondeur par les fentes verticales remplies de gypse limoneux blanc.

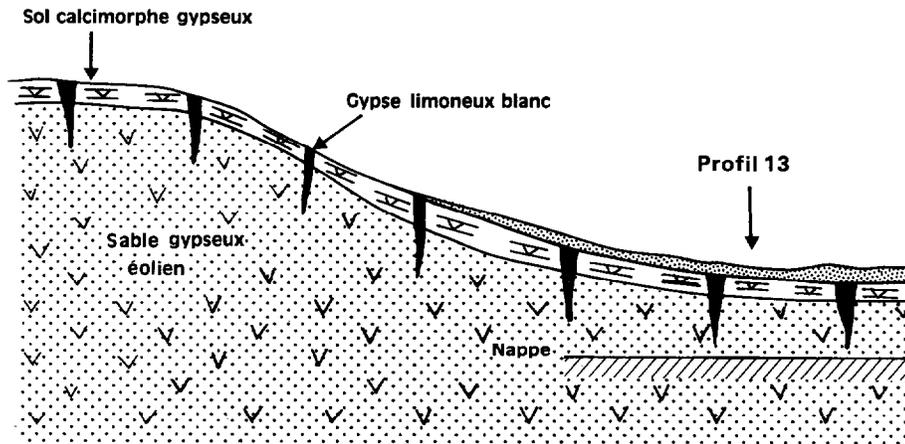


Fig. 9. — Coupe de Ben Ghilouf

L'encroûtement de surface soumis à l'action d'une nappe phréatique actuelle se consolide et forme une croûte de nappe. La préexistence d'un horizon plus limoneux et gypseux favorise cette évolution. Les fentes verticales de gypse blanc très fin et la continuité avec colline voisine atteste sans aucun doute la nature du matériau originel.

Dans la région de Douz, on peut observer des faits analogues mais les dunes encroûtées ne présentent que rarement le réseau de polygones avec leurs « racines », aussi est-il plus difficile de les interpréter.

3.3.2.5. ENCROUTEMENT DANS UN SABLE ÉOLIEN GYPSEUX

Profil de la parcelle d'essai de Bou Chemma (EL AMAMI, BALDY, POUGET, 1967)

La description et le prélèvement du profil ont été fait avant l'installation de la parcelle d'essai. Jardins peu entretenus, avec palmiers, grenadiers, oliviers, abricotiers, chiendent, etc.

- 0 - 30 cm Brun pâle 10 YR 6/3, finement sableux, un peu limoneux, meuble, petits amas gypseux en tête d'épingles, nombreuses radicelles et racines de grenadiers.
 30 - 75 cm Brun-jaune très pâle 10 YR 7/4, finement sableux, particulière, meuble, porosité tubulaire visible, quelques amas et gros nodules gypseux de 1 à 3 cm de diamètre avec parfois petits débris de charbon de bois (plâtre ancien). Nombreuses racines de palmiers, frais.
 75 - 105 cm Jaune, 10 YR 7/6, horizon de transition moins organique, sableux, particulière, petits amas cristallisés gypseux à la place de certaines vieilles racines de palmiers, humide.

105 - 150 cm *Encroûtement gypseux induré (croûte)*. 10 YR 6/8, sablo-limoneux à limono-sableux, structure à tendance lamellaire, horizon consistant et induré avec très nombreux amas et petits nodules gypseux particulièrement autour des racines de palmiers peu nombreuses, laminées, irrégulières et en mauvais état, porosité tubulaire faible sauf galeries de 5 mm de diamètre (emplacement d'anciennes racines).

On note parfois des lits horizontaux de vieilles racines emprisonnées par de très nombreux amas gypseux consolidés.

150 - 180 cm Même horizon plus consistant.

180 - 225 cm Brun pâle grisâtre 10 YR 6/2, très limoneux, consistant, peu poreux, très nombreux amas gypseux blanchâtres, présence de coquilles coniques de petits mollusques (espèce voisine des *Melanopsis*), pas de racines fonctionnelles, très humide.

— Nappe à 205 cm, le 9 octobre 1965.

Profondeur (cm)	Granulométrie					pH 1/2,5	Calcaire (%)	Gypse (%)	Mat. Org. (%)	Sat. de la pâte	Conductivité (m · mhos/cm)	Sels solubles Extrait de saturation (mé/l)					Perméabilité K (cm/h) (Hénin)
	A	L	STF	SF	SG							Cl	CO ₃ H	Ca	Mg	Na	
0 - 30	10,5	5,5	14	65	1	7,90	6,0	23,0	0,91	33,2	7,7	26	1,4	32	13	56,1	8,8
30 - 55	12,5	6,5	14	61	1	7,50	5,6	23,6	0,60	32,0	6,1	20	1,2	30	19	33,7	10,8
55 - 75	9,0	6,0	14	65	1	8,00	5,6	22,3	0,50	31,2	9,7	56	1,6	37	20	60,6	10,6
75 - 105	11,0	6,5	15	64	Tr	8,05	6,0	21,6	0,31	34,0	5,5	24	1,2	31	14	27,8	8,0
105 - 130	11,5	7,5	24	50	Tr	8,05	5,6	40,0	0,29	35,0	5,8	22	1,0	34	13	29,8	6,9
130 - 150	12,0	10,0	22	42	1	8,00	7,2	44,5	0,14	36,0	5,8	24	0,8	32	16	30,3	5,3
150 - 180	9,5	17,0	23	36	1	8,15	5,6	66,8	0,26	34,8	6,4	28	1,2	32	17	36,2	3,8
180 - 200	10,0	18,5	45	15	Tr	8,20	8,8	71,8	0,36	34,4	5,8	26	1,0	31	14	30,3	2,6
200 - 215	11,0	19,0	40	15	Tr	8,10	10,8	77,1	0,21	34,4	5,1	18	1,0	30	15	26,3	4,7

De 0 à 105 cm, le sol est homogène, sableux à sablo-limoneux avec un taux de gypse sensiblement constant (sable d'origine éolienne).

Au-delà de 105 cm, on distingue avec un horizon de transition 150-180 cm, deux formations :

— un limon sableux (105-150 cm) qui n'est autre que le sable éolien supérieur dans lequel se dépose le gypse.

— de 180 à 225 cm, la présence de gastéropodes, la texture limoneuse et le taux plus élevé de matières organiques montrent un ancien horizon de surface analogue aux sols actuels de la zone des sources en amont de la parcelle. Il est recouvert par un sable éolien dont la base se transforme en encroûtement gypseux de nappe. Le mode de formation sera envisagé au chapitre suivant.

Les exemples précédents montrent plusieurs origines possibles pour ces croûtes et encroûtements de nappe :

— Croûte gypseuse formée dans un sable dunaire grossier très calcaire avec nappe très peu salée mais sulfatée.

- Sol d'ancienne culture consolidé en croûte gypseuse avec nappe salée dont le niveau varie beaucoup suivant la saison (faibles irrigations).
- Encroûtement dans un horizon à texture fine.
- Sol de type calcimorphe consolidé en croûte gypseuse de nappe.
- Encroûtement dans un sable éolien gypseux surmontant un ancien horizon de surface à amas gypseux.

4 - FORMATION DES CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS GYPSEUX

Le dépôt de gypse ne se produit pas lorsque les solutions du sol ne sont pas saturées en sulfate même pour un résidu sec élevé.

Ainsi, le profil n° 44 El Hamadi (Zarzis)

Zone aval du périmètre d'El Hamadi. Le drainage naturel vers la mer est pratiquement impossible en raison d'un alignement de collines (grès calcaire du Thyrrénien I) parallèle au rivage.

Palmiers, orges, carottes, luzerne.

- 0 - 60 cm Brun, sable fin non gypseux, nombreuses racines de palmiers à la base.
- 60 - 80 cm Brun foncé, sablo-limoneux avec très nombreuses racines de palmiers.
- 80 - 170 cm Horizon à nodules calcaires, brun devenant beige avec beaucoup de calcaire, les nombreuses racines de palmiers descendent même dans l'horizon sous-jacent baigné par la nappe.

- Nappe à 170 cm, le 24 novembre 1966.
- Nappe à 165 cm, le 22 février 1967.

Le profil, dans son ensemble, n'est pas gypseux mais calcaire. L'irrigation se fait avec l'eau du sondage d'El Hamadi (Nappe du Miocène).

Le 22 février 1967, nous avons prélevé deux horizons 30-60 et 145-165 pour étudier les solutions du sol (Extraction sous 16 kg de pression dans la presse à membrane).

Profondeur en cm	Humidité Terrain	Humidité %			Calcaire %	Gypse %
		pF 2,3	pF 2,7	pF 4,2		
30 - 60	8,9	14,1	11,0	5,3	10,0	Traces
145 - 165	23,1	22,3	18,5	8,3	40,4	Traces

Echantillon Profondeur	Nature de l'extrait	Résidu sec g/l	Conductivité en m · mhos/cm	mé/litre					
				Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
30 - 60 cm	Extrait Sat. Presse		4,9	6,0	3,0	53,2	26,0	23,6	2,6
			11,0	6,5	10,5	99,3	63,0	42,9	6,8
145 - 165 cm	Extrait Sat. Presse	16,92	13,5 20,0	18,0 27,0	15,0 30,5	158,4 225,0	100,0 159,0	55,0 92,5	1,6 2,4
Nappe phréatique	à 165 cm	14,10	16,0	24	18	164	112	71,2	8,6

La salure de l'extrait de saturation est plus faible que celle de la solution du sol elle-même. On retrouve ici un fait connu. La différence entre les deux mesures est d'autant plus grande que le sol en place est plus sec.

La salure de la nappe phréatique est intermédiaire entre la mesure de l'extrait de saturation et la mesure obtenue avec la presse. En plus du chlorure de sodium très abondant, on note la présence de sulfates de sodium, calcium et magnésium.

Dans aucune des solutions, la saturation en gypse n'est atteinte. Il ne peut donc y avoir dépôt. Les sols de l'oasis n'étant pas gypseux, l'eau d'irrigation étant très chlorurée et peu sulfatée, la nappe phréatique et les solutions du sol n'arrivent pas à saturation.

D'autre part, de très nombreux exemples montrent que même si le sol est gypseux et la nappe saturée en gypse, il n'y a pas pour autant dépôt de gypse en amas, encroûtement ou croûte.

Ainsi, le profil n° 24 oasis de Menchia (POUGET, 1966a)

Zone de l'oasis installée sur un sable éolien gypseux. Palmiers nombreux.

0 - 30 cm Brun, sablo-gypseux, meuble.

30 - 80 cm Jaune-brun, sablo-gypseux, meuble, très nombreuses racines de palmiers.

> 80 cm Hydromorphe avec gaine grise et parfois noire (sulfures) autour des racines, sablo-gypseux, meuble.

— Nappe à 50 cm, le 25 décembre 1964.

— Nappe à 120 cm, le 25 juin 1965.

Date de prélèvement	Résidu sec en g/l	Conductivité en m · mhos/cm	mé/litre					
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
25-12-64	9,44	10,6	39	42	56	68	60	10
25- 6-65	6,76	8,3	—	—	—	41	—	—

Profondeur en cm	pH 1/2,5	Calcaire %	Gypse %	Mat. Org. %	Sat. de la pâte %	Conductivité m · mhos/cm	Sels solubles Extrait de saturation en mé/l					
							Cl	CO ₃ H	SO ₄	Ca	Mg	Na
0 - 30	8,00	5,7	52,5	1,24	32,8	6,8	37	2	57	39	21	43
30 - 80	8,05	6,1	56,4	0,76	31,2	10,0	64	9	67	39	32	74

La première condition énoncée saturation en gypse des solutions, tout en étant nécessaire, ne suffit pas.

D'autres facteurs interviennent, en particulier la dynamique des solutions et des conditions de dépôts bien définies. En effet, le gypse se présente dans le sol sous les deux phases liquide et solide. La faible capacité d'échange du sol, toujours très sableux, limite au maximum les phénomènes d'échanges, classiques pour des sols mieux dotés en éléments fins. Donc la dynamique du gypse se réduit à un échange constant entre la phase liquide et la phase solide cristallisée. Il s'agit d'un problème de formation et croissance des cristaux à partir d'une solution saturée en gypse.

4.1 - AMAS, ENCROÛTEMENTS ET CROÛTES SE FORMANT DANS LES HORIZONS DE SURFACE

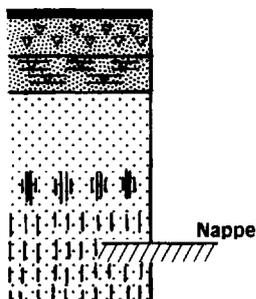


Fig. 10.

Morphologiquement, on observe toujours un horizon peu consistant avec de très nombreux amas gypseux surmontant la croûte et l'encroûtement. La limite inférieure de cette croûte est nette au-dessus de l'horizon sous-jacent généralement sableux avec gley et pseudogley en profondeur.

La nappe reste proche de la surface même en été où elle ne descend que rarement au-dessous de 1,2 m.

D'autre part, il est remarquable de constater très souvent, sinon toujours, la présence d'une végétation avec des joncs et des plantes halophiles (*Arthrocnemum*, *Aeloropus littoralis*).

En été, la salure des horizons de surface atteint son maximum car la nappe est profonde et l'évaporation importante au niveau des racines malgré la croûte saline superficielle qui freine cette évaporation. Le taux de gypse en solution et son produit de solubilité augmentent corrélativement avec la teneur en chlorures et la température.

Cette augmentation n'est pas suffisante et le produit ionique $[SO_4^{--}][Ca^{++}]$ de la solution dépasse la valeur du produit de solubilité, il y a donc dépôt de gypse par concentration des solutions.

De plus, l'activité des racines d'*Arthrocnemum* en libérant du gaz carbonique permet la formation de bicarbonates, donc d'ions Ca^{++} en excès, responsables de la précipitation des sulfates. Elle favorise aussi la concentration des solutions. Ainsi, les amas se localisent au niveau des racines et radicelles.

En hiver, l'horizon de surface est très humide et même engorgé d'eau si l'on en juge par la gaine rouille autour des nombreuses racines et radicelles. En effet, la nappe est peu profonde et les apports latéraux des eaux de ruissellement accentuent sans doute le phénomène d'autant que topographiquement la situation s'y prête. Le gypse déjà déposé diminue d'autre part la perméabilité du sol. La salure des horizons de surface baisse et la solution du sol se trouve diluée tout en restant saturée en gypse. Le produit de solubilité du sulfate diminue corrélativement avec le taux de chlorures et la force ionique de la solution. Un dépôt de gypse peut donc se produire. L'activité des racines (Joncs) en favorisant la concentration des solutions et en libérant du gaz carbonique entraîne une précipitation du sulfate de calcium dont la solubilité est moindre aussi en raison d'un abaissement de la température à cette saison.

Ainsi, pratiquement tout au long de l'année, les conditions pour une précipitation du gypse sont réunies et un processus d'évolution se déclenche à partir du stade initial des amas. Une fois commencé, le dépôt se poursuit et les amas constituent autant de pôles de cristallisation accentuant le dépôt en ces sites pour arriver au stade encroûtement et parfois croûte.

Lors du dépôt, le gypse est généralement très finement microcristallisé. Les amas se présentent comme un assemblage lâche d'une multitude de très fins cristaux plus ou moins aciculaires et à angles vifs. Il n'y a pas de cristaux lenticulaires ou en petits prismes monocliniques. Plusieurs raisons peuvent être évoquées :

— Si le matériau dans lequel se fait le dépôt est lui-même gypseux (sable éolien gypseux) les germes de cristallisation sont très nombreux et donc aussi les sites possibles pour les ions qui se fixent à la surface des « cristallites » préexistantes.

— Si le matériau n'est pas gypseux, les « cristallites » se forment lorsque la solution devient fortement sursaturée.

— Dans les deux cas, les solutions du sol fortement saturées favorisent la formation de très nombreux cristaux contrairement à des solutions faiblement sursaturées qui offrent des conditions plus favorables à la production de cristaux presque parfaits.

— Les variations au cours d'une année des conditions de dépôt en fonction de l'activité des racines, du niveau de la nappe, de la température modifient à tous moments la vitesse de croissance des cristaux qui seront donc très nombreux.

Quoiqu'il en soit, on observe que le « noyau » de l'amas devient plus dense, s'indure en prenant une allure cristalline (translucide) ; la périphérie restant très friable et finement microcristallisée (amas consolidé ou granule). Ces granules de formes irrégulières, aplaties ou grossièrement sphériques, ont tendance à se rejoindre et s'anastomoser pour arriver peu à peu au stade encroûtement et croûte si les conditions de dépôt persistent (fig. 11).

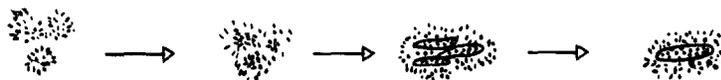


Fig. 11. — Evolution des amas gypseux.

Cette évolution peut s'expliquer d'une façon relativement simple. Au départ, le dépôt de gypse se fait sous forme de très fins cristaux groupés en amas. Or, la surface des cristaux étant le siège d'un échange incessant avec les ions de la solution, chaque ion imparfaitement placé dans le réseau du nouveau cristal (arêtes, angles) ou situé sur la périphérie de l'amas a plus tendance à s'échanger qu'un autre. Il est plus « actif », sa « solubilité » est plus grande. La conséquence est que peu à peu le cristal se perfectionne et que l'intérieur de l'amas se concentre. Les cristaux peuvent s'y développer plus facilement car

les échanges d'ions sont freinés ; la concentration de la solution y varie peu ; les gradients ou flux de concentration sont réduits. En même temps, la solubilité de cette masse cristallisée, de plus en plus dense, diminue alors que l'extérieur reste le siège d'un échange incessant d'ions avec la solution du sol (très fins cristaux plus actifs et plus solubles). Avec le temps, le « noyau » s'accroît peu à peu et arrive à se souder à ses voisins. Le même phénomène joue en effet pour l'espace compris entre les « noyaux » où le dépôt et surtout sa stabilité sont assurés. Ainsi se forment des zones et feuilletés cristallisés séparés par des espaces où l'eau circule de moins en moins facilement. Par la suite, c'est l'horizon dans son ensemble qui constitue un « milieu » particulier comme nous le verrons avec l'exemple de la parcelle d'essai de Bou Chemma.

Le profil n° 9 bis de Kriz (présence de poteries en profondeur) indique que cette évolution est rapide dans le temps. Il faut aussi noter une salure nettement plus faible dans la croûte en comparaison de l'horizon supérieur où se trouvent les amas.

4.2 - CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS SE FORMANT DANS LES HORIZONS DE PROFONDEUR

4.2.1 - Parcelle d'essai de Bou Chemma

Avec l'installation de la parcelle, un certain nombre de mesures (températures, humidité et salure) ont été effectuées. Après les avoir exposées, nous tenterons de les synthétiser pour expliquer la formation de l'encroûtement gypseux.

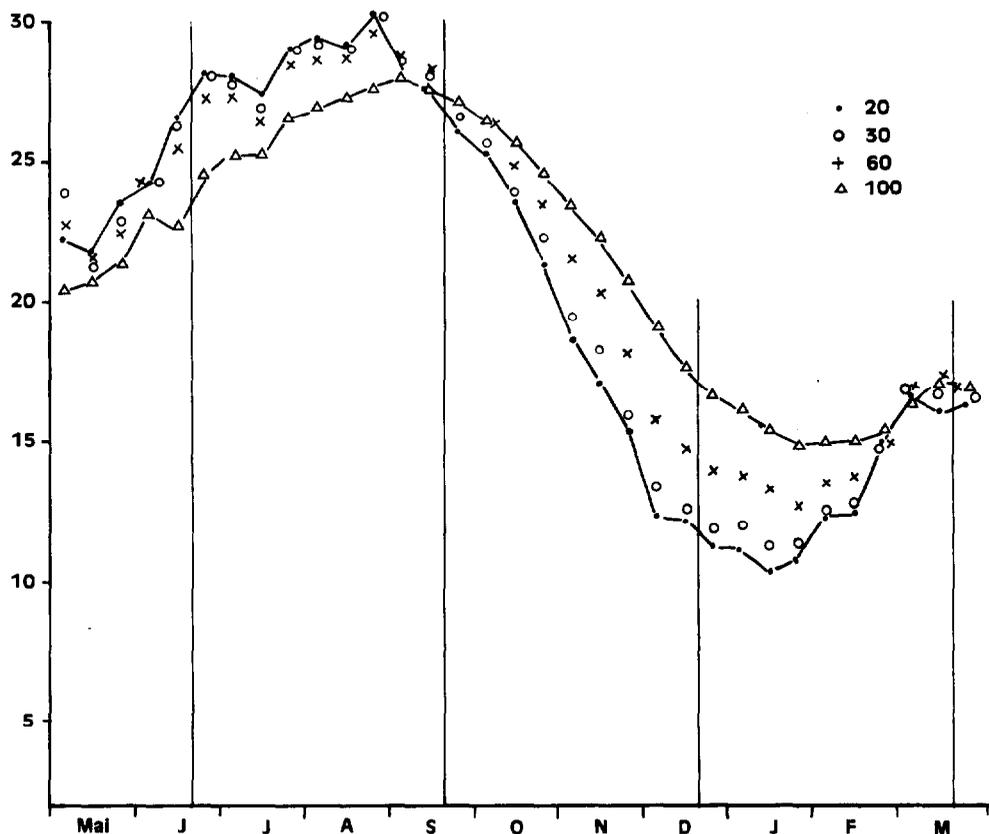


Fig. 12. — Parcelle de Bou Chemma : Variations saisonnières de la température du sol en fonction de la profondeur.

4.2.1.1. TEMPÉRATURE DU SOL

Elle est mesurée à 20-30-60 et 100 cm de profondeur (Service de Bioclimatologie de l'INRAT).

Les résultats obtenus sont classiques. En été, la température des horizons de surface reste plus élevée qu'en profondeur. L'inverse se produit durant l'hiver. Le printemps et l'automne constituent une période de transition où les températures ont tendance à s'uniformiser.

Il est important de noter la variation de la température à 100 cm de profondeur ; elle passe de 28° à 15° (30° à 10° pour l'horizon 20 cm). Dans ces conditions, la solubilité du gypse se trouve très sensiblement modifiée.

4.2.1.2. HUMIDITÉ

Nous avons effectué un assez grand nombre de mesures d'humidité dans la parcelle d'essai en utilisant l'étuve à 105 °C. Cependant, la totalité des mesures se fait maintenant à la température ordinaire sous vide dans un dessiccateur avec acide sulfurique et chlorure de calcium anhydre pour éviter la déshydratation du gypse (POUGET, 1965b).

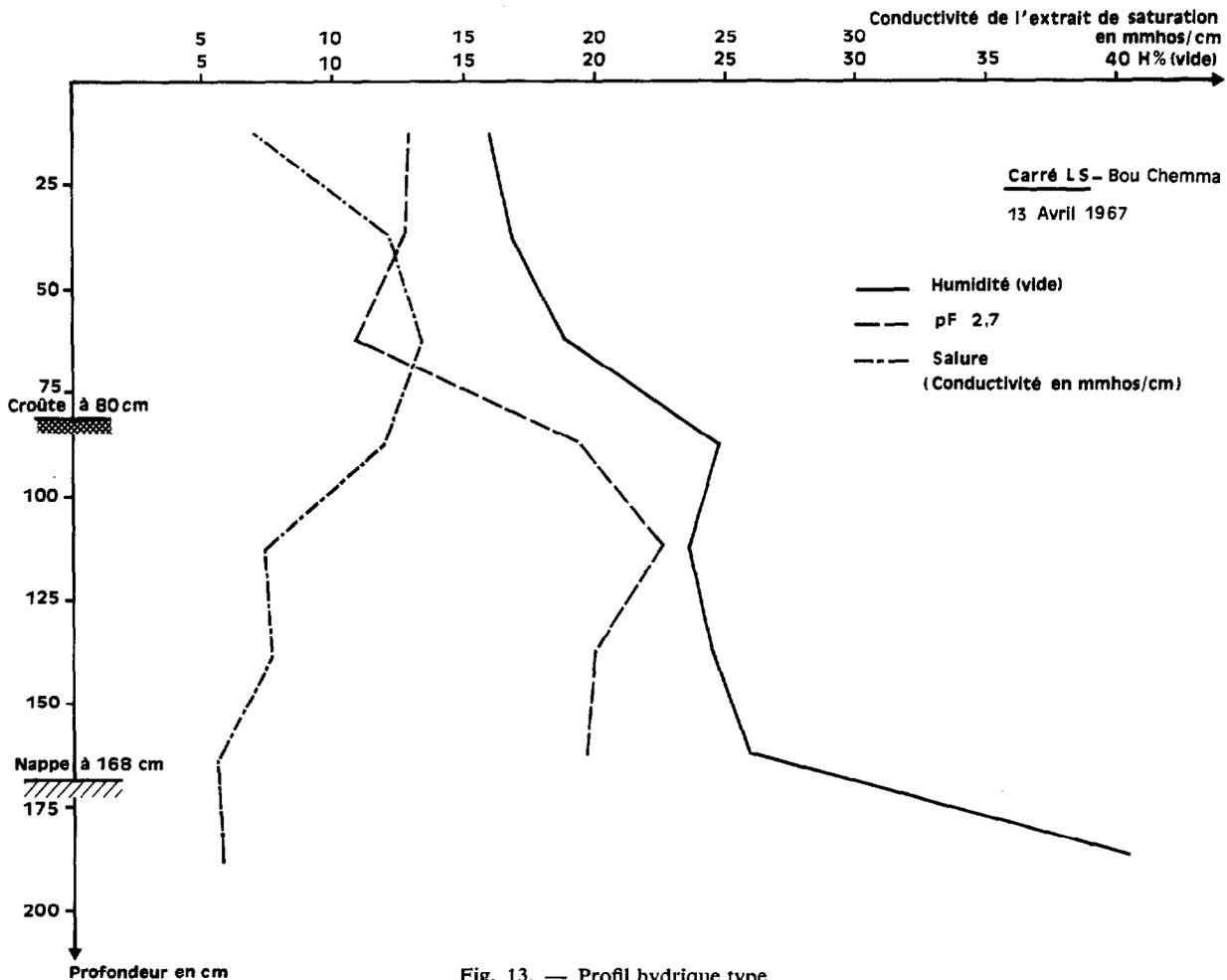


Fig. 13. — Profil hydrique type.

Le profil hydrique est en relation avec la profondeur de la nappe phréatique et les fréquences et doses d'irrigation. Ainsi, le niveau de la nappe oscille entre 2 et 2,5 m en été, et en hiver entre 1,5 et 2 m. La pluviométrie intervient également : la pluie de 60 mm le 12 février 1967 a eu pour effet une remontée de la nappe de 50 cm pendant plusieurs semaines.

Le graphique ci-dessus montre un *profil hydrique type* dans le carré L5 où la croûte est à 80 cm environ. Le prélèvement a été fait le 13 avril 1967, trois jours après une irrigation de 80 mm. On observe un *horizon d'us humide* au-dessus de 75 cm alors que dans la croûte elle-même l'humidité est sensiblement constante au-dessus de la nappe. Cependant, il faut noter l'horizon 100-125 cm plus sec ; d'ailleurs, c'est une zone très indurée difficile à traverser à la tarière. Au niveau de la nappe l'horizon est saturé d'eau. Le dessèchement du profil se traduit, entre deux irrigations, par une diminution d'humidité des horizons de surface jusqu'à la croûte avec toujours une zone plus humide au-dessus. Il est remarquable de noter aussi une faible variation saisonnière d'humidité dans la croûte sauf la partie inférieure affectée par la nappe.

La différence de perméabilité (voir résultats d'analyse, p. 345) explique les phénomènes observés : bien que la capacité de rétention soit plus élevée dans l'encroûtement, le volume des pores disponibles est faible, les mouvements de l'eau sont ralentis et la quantité d'eau constante d'autant que les racines peu nombreuses ne peuvent intervenir beaucoup.

En définitive, le profil se caractérise par deux horizons dont le régime hydrique diffère :

— Au-dessus de la croûte, le profil hydrique est variable car soumis aux humectations successives (irrigations et pluies) et aux dessèchements provoqués par l'activité des racines (cultures maraîchères et fourragères en surface, palmiers en profondeur) et par l'évaporation du sol lui-même.

— Dans la croûte, le profil hydrique est « tamponné » donc sensiblement constant au cours de l'année, sauf pour la partie inférieure qui est fonction du niveau de la nappe.

4.2.1.3. SALURE

Profil de salure

Dans le même carré L5, l'analyse de la salure (extrait de saturation) montre un profil très caractéristique. En effet, ici aussi existe une différence très nette entre la croûte et l'horizon supérieur sableux :

— Au-dessus de la croûte, la salure est variable avec un maximum dans l'horizon 50-75 cm où la conductivité dépasse 10 m · mhos/cm.

— Dans la croûte, la salure plus élevée à la partie supérieure diminue progressivement en profondeur en restant généralement plus faible que dans l'horizon précédent.

Il y a donc une accumulation des sels au-dessus de la croûte, ceci étant dû pour une large part, à la perméabilité moindre de celle-ci et à l'activité maximum des racines de palmiers très abondants à ce niveau.

Date du prélèvement Profondeur en cm	Conductivité Extrait Sat. en m · mhos/cm	
	22-2-66	24-6-66
0 - 25 cm	27,3	8,0
25 - 50 cm	10,5	8,0
50 - 75 cm	7,8	7,4
75 - 90 cm	8,1	12,4
Profondeur de la nappe	146 cm	223 cm

Etude du profil n° 12

Il se trouve dans un jardin voisin de la parcelle où la croûte est à 110-120 cm de profondeur. Les irrigations y sont très irrégulières et la culture très négligée sinon inexistante.

Nous avons effectué des prélèvements à la tarière, mais malheureusement à des profondeurs variables, pour étudier les différences entre les mesures de salure de l'extrait de saturation et des solutions du sol extraites sous 16 kg de pression (presse à membrane). Les résultats trop partiels ne peuvent être interprétés valablement. Néanmoins, quelques conclusions apparaissent :

— Les différences entre les deux mesures sont assez faibles en valeur absolue avec toujours une salure moins élevée pour l'extrait de saturation.

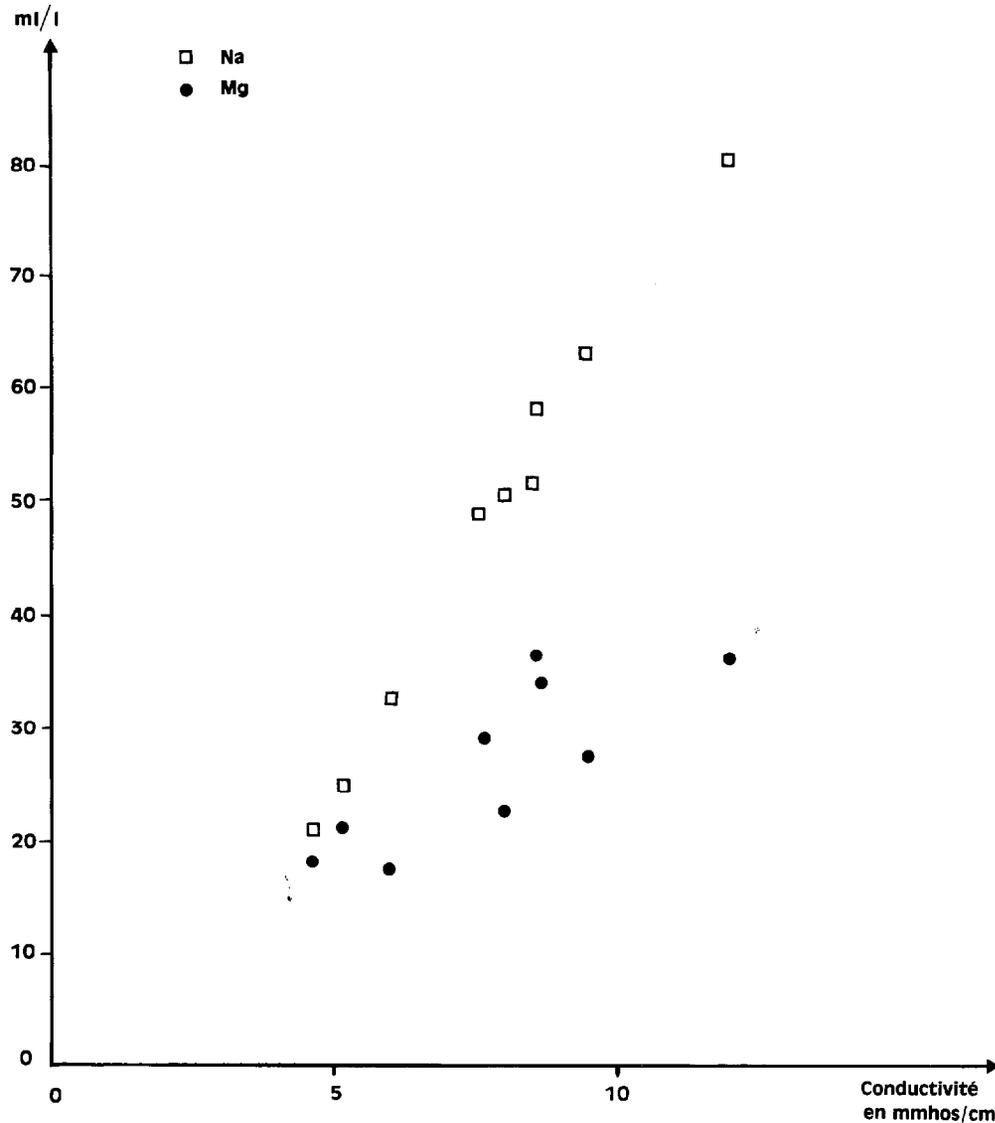


Fig. 14. — Variation relative de la concentration en ions Mg⁺⁺ et Na⁺ dans la solution du sol (presse) en fonction de la conductivité.

- L'horizon dans la nappe a une salure pratiquement identique à la nappe elle-même.
 - La salure dans la croûte est sensiblement constante à une époque donnée mais plus élevée lorsque la nappe est plus profonde (en été).
 - La pluie de 60 mm, le 12 février, a eu pour effet, un important lessivage des chlorures dans l'horizon de surface avec augmentation relative de SO_4^{--} et Ca^{++} ; la solution reste saturée en gypse. L'ensemble du profil est par ailleurs moins salé qu'en été. Une légère accumulation de sels subsiste au-dessus de la croûte.
 - Les solutions sont toujours saturées en gypse avec un taux de Ca^{++} sensiblement constant, légèrement plus élevé lorsque la salure augmente. De même SO_4^{--} est plus élevé lorsque Cl^- augmente (le dosage des sulfates n'a pas une précision suffisante en raison de la prise d'essai très faible pour l'analyse).
 - Le graphique ci-dessus (fig. 14) montre l'accroissement plus important de Na^+ par rapport à Mg^{++} lorsque la conductivité augmente. Or, ceci correspond sensiblement aux deux sels : chlorure de sodium et sulfate de magnésium. Pour les salures peu élevées (4 à 6 mhos/cm) ils sont en quantité équivalente. Dès que la conductivité atteint 8-10 m · mhos/cm, le taux de chlorure de sodium double par rapport au sulfate de magnésium. La solubilité du gypse se trouve donc modifiée.
- Le produit de solubilité est plus faible dans le premier cas (salure peu élevée) car le taux de chlorure peu important n'augmente que légèrement la solubilité du gypse d'autant que son action est encore contrebalancée par un taux équivalent de sulfate de magnésium. Par contre, dans le second cas (salure élevée), l'action du chlorure de sodium s'accroît, non seulement du fait de sa concentration plus élevée, mais également en raison du rôle moindre joué par le sulfate de magnésium.
- D'autre part, après l'extraction sous 16 kg de pression, nous avons fait un extrait de saturation sur l'échantillon de sol au sortir de la presse. L'analyse montre une forte diminution des sels solubles : sulfate de magnésium et surtout chlorure de sodium.

Prélèvement du 14-11-66	Nature de l'extrait	Conductivité en m · mho/cm	mé/litre					
			Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
Profil n° 12 195-215 cm	Extrait de saturation	7,8	36,0	29,0	48,4	44,0	54,9	1,6
	Presse	8,6	33,0	36,0	51,5	45,0	58,3	2,6
	Extrait de saturation après extraction 16 kg	4,2	28,0	18,0	13,4	10,9	42,0	1,2

La solution, tout en restant saturée en sulfate de calcium, contient moins de gypse dissous et même, a un taux légèrement inférieur à celui observé dans l'eau pure aux erreurs d'analyses près. Le rôle du sulfate de magnésium apparaît ici pleinement d'autant que le chlorure de sodium se trouve en quantité très faible.

4.2.1.4. INTERPRÉTATION

Il est difficile avec des résultats aussi fragmentaires, de proposer une interprétation suffisante pour expliquer la formation de l'encroûtement gypseux de nappe. De plus, le profil présente une particularité : le taux de gypse diminue de la base au sommet de la formation gypseuse contrairement à ce que l'on

observe généralement. En fait, comme nous l'avons indiqué précédemment, le matériau originel est complexe : horizon 180-225 cm plus gypseux et à texture plus fine dès l'origine (horizon ancien d'amas gypseux en zone hydromorphe de bordure de source) recouvert d'un dépôt de sable éolien gypseux.

La différence de nature des deux milieux s'est traduite au départ par des caractéristiques physiques (perméabilité) et chimiques (salure) non identiques qui ont favorisé un dépôt de gypse à la partie supérieure de l'horizon 180-225 cm. En effet, les racines de palmiers, comme on peut le voir, descendaient jusqu'à ce niveau contribuant à accentuer la salure au-dessus de cet horizon. La succession des dépôts en réduisant le champ d'exploration des racines, fait « remonter » l'encroûtement vers le haut.

Il semble donc que le dépôt de gypse se fasse à la limite de deux horizons où le régime de salure et d'humidité sont différents.

En été, la nappe étant profonde (environ 2 à 2,50 m), l'ensemble du profil se dessèche, surtout les horizons au-dessus de l'encroûtement, la salure augmente, l'activité des racines de palmiers est maximum. Dans l'état actuel des irrigations, celles-ci ne peuvent guère limiter l'augmentation de salure car elles suffisent à peine à assurer les besoins des plantes. La quantité de gypse dissous et la valeur du produit de solubilité atteignent leur maximum en relation avec une teneur élevée en chlorure de sodium et son action prépondérante sur le sulfate de sodium. Il se produit un dépôt de gypse par concentration des solutions sans omettre le rôle joué par la respiration des racines (libération de gaz carbonique). Ainsi, on observe la formation d'amas autour des racines principalement.

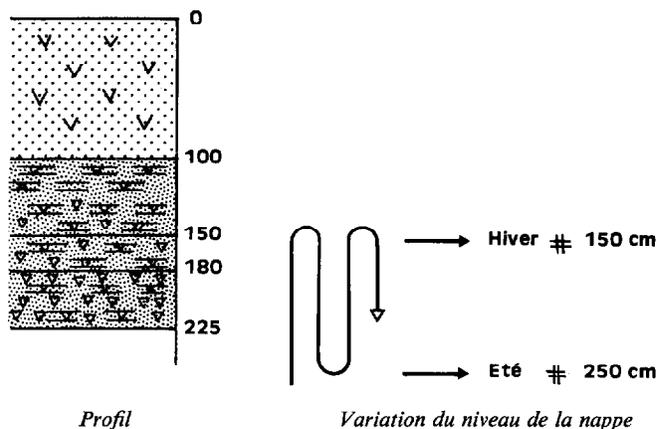


Fig. 15.

A l'intérieur de l'encroûtement, l'humidité reste sensiblement constante et ne descend que très peu au-dessous de la capacité de rétention. La salure, légèrement plus élevée à la partie supérieure varie également très peu. Le gypse se dépose et surtout l'intérieur des amas se consolide ; l'évolution vers le stade « feuillets » est possible car les solutions relativement stables permettent une telle organisation.

En hiver, la remontée de la nappe, éventuellement les pluies et une ETP bien plus faible contribuent à une diminution générale de la salure. D'autre part, la température moins élevée (15° à 100 cm) et la diminution relative des chlorures par rapport au sulfate de magnésium en particulier vont diminuer la valeur du produit de solubilité du gypse qui peut précipiter et spécialement là où la salure était la plus forte : horizon au-dessus de l'encroûtement et partie supérieure de l'encroûtement.

Au fur et à mesure, les propriétés physiques se modifient, la perméabilité diminue et le gypse déposé se trouve « pris » dans un milieu où l'eau circule de plus en plus difficilement et où la redissolution est de moins en moins possible d'autant que les conditions de dépôt se trouvent réalisées pratiquement tout au long de l'année. Ainsi, la croissance de l'encroûtement se fait vers le haut en même temps que l'intérieur évolue d'une façon de plus en plus irréversible.

En définitive, dans un sol gypseux, et en présence d'une nappe saturée en gypse, la végétation (palmiers), l'existence au départ de deux horizons de nature différente, et les variations du niveau de la nappe sont les principaux facteurs qui permettent la formation de l'encroûtement et déclenchent un processus d'évolution typique modifiant peu à peu toutes les propriétés physiques ou chimiques du profil.

4.2.2 - Autres exemples

Profil n° 109 oasis de Mansoura

Les irrigations trop faibles obligent les palmiers à puiser largement en profondeur, augmentant ainsi la salure au-dessus du niveau de la nappe dont le niveau baisse beaucoup en été. Les solutions se concentrent avec dépôt de gypse. En hiver, la nappe remonte, la salure diminue avec possibilité de précipitation de gypse à ce même niveau. Il se constitue ainsi l'amorce d'un horizon plus compact qui par la suite accentue le phénomène en limitant progressivement la pénétration des racines vers le bas.

Profils n° 12 et 70 oasis d'Oudref

La texture et surtout le niveau de la nappe déterminent la profondeur de l'encroûtement dans le profil n° 70. Il est remarquable de noter que d'une façon très générale l'encroûtement ou la croûte se trouvent de 20 à 60 cm au-dessus du niveau de la nappe en hiver.

Dans le profil n° 12, la limite horizon sableux — horizon à texture fine favorise par ailleurs le dépôt de gypse.

A Kébili, Rhenouche, El Hamma de Gabès, etc., un sable gypseux d'origine éolienne constitue un matériau de choix pour la formation d'une croûte de nappe. Si le dépôt sableux repose sur un matériau non gypseux, la croûte se forme préférentiellement dans le matériau gypseux et elle peut être très épaisse (jusqu'à 2-3 m d'épaisseur). Le dépôt de gypse est faible en valeur absolue mais il subsiste un gradient caractéristique avec augmentation du taux de gypse de la base au sommet de la croûte. LE HOUEROU (1960) souligne l'importance d'un « matériau sableux riche en gypse au départ » dans la genèse des encroûtements.

Profil n° 13 oasis de Ben Ghilouf

L'ancien encroûtement de gypse limoneux blanc (sol de type calcimorphe) offre un milieu tout « préparé » pour permettre l'évolution des amas en croûte de nappe.

4.2.3 - Remarques concernant la formation des cristaux de gypse type « rose de sable »

La taille des cristaux type « rose de sable » que nous avons généralement observés varie de 0,5 à 10-20 cm environ. Ils peuvent être isolés ou au contraire plus ou moins soudés entre eux formant un véritable encroûtement.

On les trouve toujours dans un matériau non gypseux, le plus souvent un sable fin à grossier, siliceux ou calcaire, et jamais dans un matériau sableux finement gypseux.

Dans les zones de sources d'origine artésienne, il est fréquent d'avoir de tels cristaux dans un sable non gypseux et hydromorphe (vert, ocre, gris) comme à Seftimi, Oum Soumaa, Mansoura, Rhenouche, etc. Nous les avons signalés également dans l'horizon sableux ou sablo-limoneux situé sous les croûtes gypseuses de nappe formées sur sable éolien gypseux (Kébili, Douz, etc.).

Au sud du Chott Djérid, à Redjem Maatoug, on note la présence d'une véritable croûte très cristallisée (20 à 80 cm d'épaisseur) dans un sable éolien grossier siliceux. La nappe est alors à 3-4 m de profondeur, peu salée mais riche en sulfate. Ce type de croûte se rapproche vraisemblablement beaucoup des formations gypseuses très grossièrement cristallisées du Souf (El Oued en Algérie). D'autre part, à *Djerba* : Profil n° 80 bis (à proximité du profil n° 80) on observe un horizon de petites roses de sable, parfois soudées entre elles, au-dessus et dans la nappe phréatique dont la composition chimique est identique à celle du profil n° 80 (fig. 16).

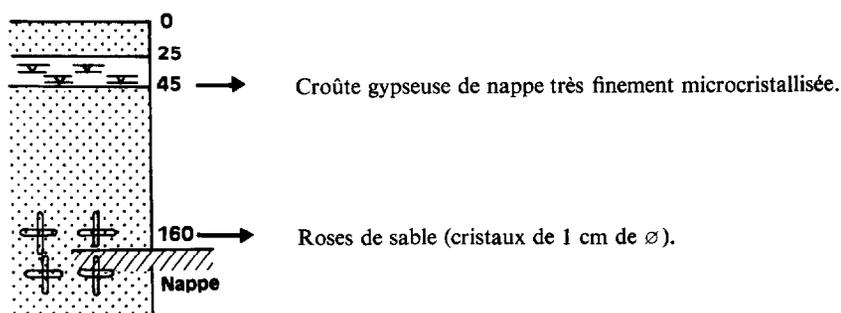


Fig. 16. — Profil de Djerba n° 80 bis

Il apparaît que les conditions de formation de ce type de cristaux nécessitent :

— Un milieu « aéré » sableux non gypseux. Si le sable est finement gypseux, les cristaux seront nombreux et petits en raison d'une multitude possible de germes de cristallisation.

— Une solution du sol faiblement saturée car les formes de cristallisation ont tendance à se compliquer de plus en plus avec la sursaturation (DEICHA, 1945).

— Un régime presque permanent de formation et une vitesse de croissance faible, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de changement trop rapide dans la composition chimique de la solution et dans le régime hydrique. En effet, en règle générale les faces des cristaux qui augmentent sont celles qui croissent lentement.

Les cristaux type « rose de sable » se forment donc légèrement au-dessus et dans la nappe elle-même (Djerba) faiblement saturée dans un milieu sableux non gypseux où la végétation n'intervient pas, au moins directement.

La permanence d'une nappe analogue provenant d'émergences artésiennes dans les sables dunaires siliceux non gypseux (sud du Chott Djérid, peut-être également région du Souf) a pu déterminer la formation des croûtes très grossièrement cristallisées que l'on y observe. L'abaissement du niveau statique les a parfois dégagées plus ou moins complètement.

5 - CLASSIFICATIONS DES SOLS A CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS GYPSEUX DE NAPPE

Dans la classification utilisée actuellement en France (AUBERT, 1965) ils se répartissent dans les deux classes des sols halomorphes et hydromorphes.

5.1 - SOLS HALOMORPHES

S/Cl₁ = Sols à structure non dégradée

Groupe = Sols salins

La texture rarement argileuse et l'omniprésence du gypse dans la solution du sol, limitent au maximum les phénomènes d'alcalinisation ou tout au moins leur appréciation possible sur le terrain et au laboratoire.

Sous-groupe = $\left\{ \begin{array}{l} \text{Sols salins à encroûtement salin superficiel} \\ \text{Sols à horizon superficiel friable} \end{array} \right.$

Les sols où l'encroûtement gypseux de nappe se fait dans les horizons de surface se classent généralement dans le premier sous-groupe. La salure est très élevée dans les premiers centimètres.

Le second regroupe une partie des sols où le dépôt se fait dans les horizons de profondeur.

Il serait peut-être intéressant de proposer un nouveau sous-groupe, car l'encroûtement constitue une caractéristique essentielle du profil, où le chlorure de sodium, en particulier, joue un rôle important dans la dynamique du gypse. Il pourrait, éventuellement, être le suivant : Sols salins hydromorphes à amas et encroûtement gypseux de nappe. Une telle proposition avait déjà été formulée par LE HOUEROU (1960) et NOVIKOFF (1961).

Problème des sols de type calcimorphe gypseux

Les croûtes et encroûtements anciens de nappe évoluent en sols de type calcimorphe gypseux dès qu'ils affleurent depuis longtemps. Il se forme un encroûtement de gypse pulvérulent blanc, dans les 30 ou 40 premiers centimètres, surmonté de plaques indurées peu épaisses, découpées suivant un réseau de polygones (croûte).

La végétation est très typique : *Lygeum spartum*, *Atractylis serratuloïdes*, *Annarhinum brevifolium*, *Erodium glaucophyllum*, etc. Le plus souvent, il s'agit de formations anciennes, dont l'évolution actuelle est limitée sans pour autant être négligeable.

Dès que l'encroûtement ancien de nappe s'est trouvé en surface, n'étant pas soumis par ailleurs à l'action d'une nappe phréatique, il est livré aux conditions climatiques locales. Les pluies en particulier, vont humecter, à l'occasion, une certaine profondeur de sol (1 à 40 cm). Une dissolution de gypse se produit, et l'activité des racines permet un nouveau dépôt de gypse en amas très fins (nombreux germes

de cristallisation). Cela se produit aussi, sans action de la végétation, lorsque le sol se dessèche. L'alternance dissolution-dépôt, favorise dans ce milieu, une pulvérisation du gypse en amas, et la formation de l'encroûtement limoneux blanc. En l'absence de véritable complexe absorbant les phénomènes d'échanges sont très limités et seule la dynamique des sels (sulfate de calcium surtout) caractérise ce type de profil commun dans un sol salin.

D'autre part, dans la genèse des blocs de croûte de surface, interviendrait peut-être, le phénomène de déshydratation du gypse. En effet, durant la saison chaude, la température du sol atteint facilement 60 °C à 70 °C sur quelques centimètres. En atmosphère non saturée, une partie du gypse se transforme alors en semi-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ très instable et cinq fois plus soluble que le gypse. En fin de journée et pendant la nuit, l'abaissement de température qui modifie la tension de vapeur d'eau, et l'hygroscopicité du gypse, entraînent une mise en solution des deux sulfates dont le moins soluble précipite (gypse). Ce serait un mécanisme identique à la prise du plâtre (PASCAL, 1958).

Jusqu'à présent, les sols de ce type sont classés dans les sols calcomagnésimorphes (sous-classe : sols à accumulation gypseuse). Bien que la conductivité d'une solution saturée de CaSO_4 soit de 1,9 mmhos/cm à 25 °C, on note une salure plus élevée, pratiquement toujours supérieure à 3 mmhos/cm, atteignant 10 mmhos/cm parfois en raison de la présence des autres sels : chlorure de sodium, sulfate de magnésium, etc. La végétation très caractéristique, la teneur en matière organique extrêmement faible des horizons de surface (< 1 %), le rôle joué par le chlorure de sodium et le sulfate de magnésium dans la dynamique du gypse, apportent quelques éléments pour envisager de les classer dans les sols halomorphes. Ils pourraient être le groupe des sols gypseux à croûte et encroûtement de la sous-classe 1, avec sous-groupes à encroûtement et à croûte.

S/classe 1 = Sols à structure non dégradée

— Groupe *a* - Sols salins

S/groupe = Sols salins hydromorphes à amas et encroûtement gypseux.

— Groupe *b* - Sols gypseux à croûte et encroûtement

S/groupe = Sols gypseux à encroûtement

= Sols gypseux à croûte

5.2 - SOLS HYDROMORPHES

S/classe 3 = Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères

Groupe = Sols à redistribution du calcaire et du gypse

Dans ces conditions, le dépôt de gypse se fait dans les horizons de profondeur ou moyenne profondeur, à partir de nappes phréatiques et solutions du sol, peu salées mais saturées en sulfates : Profil n° 80 de Djerba, région de Douz et sud du chott Djerid.

D'autre part, dans les oasis et dans les zones en aval, la nappe phréatique plus réductrice, détermine la formation de gley et pseudogley typiques, souvent associés aux formations gypseuses de nappe.

Il est souvent distingué dans ce groupe, deux sous-groupes :

— à amas et nodules,

— à croûte gypseuse.

6 - CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les croûtes et encroûtements gypseux de nappe très répandus dans le Sud-Tunisien, présentent des faciès variés en fonction de leur âge, du matériau dans lequel ils se sont formés ou évoluent actuellement et des autres facteurs de formation : niveau et salure de la nappe phréatique, végétation, etc.

Il existe des croûtes et encroûtements gypseux anciens, maintenant non fonctionnels, correspondant à un niveau statique maximum des nappes artésiennes et phréatiques. L'aridité croissante du climat a réduit progressivement leur aire de formation actuelle.

De nos jours, ils se localisent dans les zones où subsiste une nappe phréatique, alimentée essentiellement par des apports d'origine profonde (sources, émergences, forages). D'une façon plus générale, de même que beaucoup de sols halomorphes qui sont en relation étroite avec l'hydrogéologie, ils apparaissent comme des « révélateurs » des zones d'artésianisme : sols halomorphes le long de la route El Hamma de Gabès-Kebili, Douz, Métouia, Aouinet, chott Djerid, etc.

On distingue d'une part, les croûtes et encroûtements d'origine ancienne, mais pour lesquels les conditions de formation subsistent avec une nappe phréatique à faible profondeur, et d'autre part, les croûtes et encroûtements dont la genèse est nettement actuelle. Ces derniers se forment, soit dans les horizons de surface, soit dans les horizons de profondeur du profil.

Les caractéristiques morphologiques et analytiques présentent peu de différences pour l'ensemble. Seule, l'étude du milieu (géomorphologie, niveau et salure de la nappe, matériau originel, végétation) permet de les distinguer. L'induration et l'épaisseur seraient plus fortes pour les plus anciens. Il ne semble pas, que la netteté des formes cristallines soit un critère, car elle dépend des conditions de dépôt. Par contre, d'une façon générale, la taille et l'importance de la « masse cristalline » augmente avec le temps car sa solubilité diminue.

Il est possible de dégager quelques constantes morphologiques et analytiques, malgré une diversité de faciès liée au processus et aux facteurs de formation :

— Schématiquement, on observe trois stades morphologiques : amas, encroûtement et croûte parfois associés dans un même profil. L'encroûtement, surmonté d'un horizon d'amas, est au-dessus de la croûte lorsqu'il se forme dans les horizons de surface. C'est généralement l'inverse pour les horizons de profondeurs. De toutes façons, la distinction difficile entre la croûte et l'encroûtement, repose surtout sur un critère agronomique (pénétration ou non des racines).

— La texture souvent sableuse à sablo-limoneuse (faciès de grès plus ou moins grossier et consolidé) dépend pour beaucoup du matériau originel et des conditions de dépôt.

— La structure massive avec éclats polyédriques, présente très fréquemment une tendance lamellaire à feuilletée.

— La perméabilité demeure fortement réduite par rapport au sol dans lequel s'effectue le dépôt. Cela étant dû à la structure et surtout à une faible porosité et une forte densité.

— La teneur en gypse se situe entre 20 et 80 %. Dans un même profil, le taux de gypse est plus élevé dans la croûte que dans l'encroûtement, et souvent plus élevé dans l'horizon d'amas, mais alors la densité est fort différente. Selon le matériau originel, telle croûte très indurée, aura 30 ou 40 % de gypse alors qu'ailleurs, un taux de 70-80 % est nécessaire (mais non suffisant) pour un encroûtement.

— Le profil de salure se caractérise très souvent par une salure moindre dans l'encroûtement, que dans la croûte. Il est difficile de définir un profil type, car plusieurs cas sont possibles suivant la saison, la hauteur de nappe, le niveau de formation de l'encroûtement.

Dans le profil, la croûte ou l'encroûtement se trouve en général à la limite, ou dans le voisinage immédiat d'horizons de salure différente ; cela, étant un effet de la présence de la croûte, en même temps qu'une des causes de sa formation.

Le dépôt de gypse dans le sol se fait dans une solution saturée ou sursaturée en sulfate de calcium. La saturation de la nappe et des solutions du sol est obtenue pour des résidus secs, allant de 3 - 4 g/l à plus de 30 g/l, en fonction de la teneur en chlorures et sulfates de sodium et magnésium.

La stabilité ou au contraire les variations du niveau du plan d'eau, jouent un rôle essentiel en même temps que la nature du sol et la végétation, pour créer une différenciation des profils hydriques et de salure, qui suivent un rythme saisonnier. Dans le cas des oasis, les irrigations changent la fréquence et l'intensité des phénomènes dont le rythme conserve cependant, la même allure saisonnière.

En été, le dépôt du gypse se fait par concentration des solutions au niveau de la frange capillaire de la nappe où l'activité des racines est maximale. Le dégagement de gaz carbonique provoqué par la respiration du système racinaire, favorise la précipitation du gypse, par la formation de bicarbonates. Une absorption sélective des ions Cl^- (diamètre plus faible) par rapport aux ions SO_4^{--} pourrait éventuellement modifier le produit de solubilité du gypse et entraîner aussi un dépôt.

En hiver, et spécialement dans les horizons où la concentration des solutions a augmenté la salure et le produit de solubilité du sulfate de calcium, la diminution de salure peut entraîner un dépôt de gypse. En effet, cette diminution se traduit par un changement dans la teneur relative des chlorures (sodium et magnésium) par rapport aux sulfates (sodium et surtout magnésium) ; le produit de solubilité du gypse, déjà plus faible à cause de la température, diminue encore avec une influence accrue des autres sulfates (effet d'ion commun). Un nouvel état d'équilibre s'installe au cours duquel le gypse en excès précipite.

La permanence des conditions de dépôt en été et en hiver dans un même horizon, favorise donc la formation des croûtes et encroûtements gypseux de nappe.

Le dépôt se fait généralement sous forme d'amas blanchâtres, très finement microcristallisés et très friables. Leur évolution conduit progressivement à des granules et feuillets mal définis, qui peu à peu, s'anastomosent latéralement en s'indurant, pour former l'encroûtement et éventuellement la croûte. Les caractéristiques physiques et chimiques de l'horizon, se trouvent donc progressivement modifiées avec accentuation des différences dans les profils d'humidité et salure. A l'intérieur de l'horizon, la porosité diminue (forte augmentation de densité), les solutions circulent de plus en plus difficilement, et le dépôt de gypse se poursuit. Les vides entre les cristaux peuvent ainsi se combler, et l'on obtient une « masse cristalline » relativement peu soluble. RUELLAN (1966) envisage un processus analogue pour le calcaire.

La nature du matériau dans lequel se fait le dépôt intervient, non seulement pour en favoriser la formation, mais également pour en déterminer les caractéristiques morphologiques. Ainsi une différence de granulométrie et de teneur en gypse entre deux horizons, et une texture sableuse, sont autant d'éléments favorables au dépôt du gypse. D'autre part, dans un horizon préalablement gypseux (sable éolien par exemple) il n'y a pas de formes cristallines nettement individualisées comme dans un sable non gypseux, et le dépôt de sulfate en valeur absolue reste faible, du fait d'une simple recristallisation du gypse.

La végétation, tout en étant un des facteurs principaux de formation, contribue à donner un faciès microcristallisé évoluant en « masse cristalline » où les cristaux « type rose de sable » ne peuvent se former. En effet, la sursaturation des solutions devient trop élevée, et les conditions de croissance des cristaux

sont en perpétuel changement fonction de l'activité biologique avec en plus l'introduction « d'impuretés » organiques favorables à une microcristallisation.

Pratiquement, dans les oasis, ces formations gypseuses de nappe constituent un facteur limitant très important, en particulier pour les cultures arbustives (palmiers et arbres fruitiers). Elles bloquent parfois très brutalement l'accroissement en profondeur des racines qui viennent « s'écraser » sur un véritable banc gréseux.

D'autre part, il se forme souvent au dessus de l'encroûtement, un horizon hydromorphe (pseudogley radulaire avec sulfures) en même temps que la salure augmente beaucoup à ce niveau. Pour une exploitation rationnelle des oasis, le problème est de savoir si cet encroûtement ne va pas s'indurer davantage lorsque le réseau de drainage sera complètement installé. En fait, les observations que nous avons pu faire sur le terrain et les hypothèses que nous avons envisagées au cours de cette étude, montrent qu'il n'en sera rien si les irrigations sont suffisantes. Elles auront pour effet de régulariser le profil de salure, donc de limiter le dépôt de gypse par augmentation ou diminution de concentration des solutions et cela, surtout si la croûte et l'encroûtement sont relativement perméables.

BIBLIOGRAPHIE

- AKHVLEDIANI (G.K.), 1965. — Genesis of humid-sulphate soils of Georgia. *Soviet Soil Sci.*, n° 6, pp. 644-671.
- AUBERT (G.), 1965. — Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes de sols utilisés par la Section de Pédologie de l'ORSTOM, 1965. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 3, pp. 269-288.
- BELLAIR (P.), 1954. — Sur l'origine des dépôts de sulfate de calcium actuels et anciens. *C. R. Acad. Sc.*, 239, pp. 1059-1061.
- BEN SALAH (A.), 1966. — Etude de l'irrigation traditionnelle dans l'oasis de Gabès. *Sect. Et. Pédol.*, E.S., n° 60, Tunis, 42 p. multigr.
- BUREAU (P.), ROEDERER (P.), 1961. — Contribution à l'étude des sols gypseux de la partie sud du Golfe de Gabès. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, n° spéc., pp. 150-176.
- CASTANY (G.), 1953. — Notice explicative de la carte géologique de la Tunisie au 1/500 000. *SEFAN*, Tunis, 143 p.
- CHARLOT (G.), 1963. — L'analyse qualitative et les réactions en solutions. *Masson et Cie*, Paris, 442 p.
- COINTEPAS (J.P.), 1965. — Irrigation à l'eau salée et drainage en Tunisie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 4, pp. 299-305.
- COQUE (R.), 1962. — La Tunisie présaharienne : étude géomorphologique. *Thèse Fac. Lettres, A. Colin*, Paris, 488 p.
- DAMAGNEZ (J.), RIOU (Ch.), VILLELE (O. de), EL AMAMI (S.), 1963. — Problèmes d'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Ann. agron.*, 14, 4, pp. 543-558.
- DEICHA (G.), 1943. — Genèse et faciès du gypse. *Bull. Soc. fr. Minér.*, t. XVI, pp. 153-160.
- DEICHA (G.), 1945. — Les faciès cristallographiques de sursaturation et de surfusion. *Bull. Soc. fr. Minér.*, t. 68, pp. 198-202.
- DESSUS (P.), 1947. — Etude préliminaire concernant diverses oasis du Nefzaoua. *Sect. Et. Pédol.*, n° 72, Tunis, 20 p. multigr.
- DESSUS (P.), 1955. — Présence et reformation d'un horizon à accumulation gypseuse après défoncement. *Sect. Et. Pédol.*, Tunis, rapport non diffusé, 4 p.
- DIMANCHE (P.), 1964. — Etude pédologique de l'oasis de Nefta. *Sect. Et. Pédol.*, n° 240, Tunis, 46 p. multigr.
- DUCHAUFOUR (Ph), 1965. — Précis de pédologie, 2^e éd., *Masson et Cie*, Paris, 481 p.
- DURAND (J.H.), 1949. — Etude géologique, hydrologique et pédologique des croûtes en Algérie. *Thèse Ing. Doct. Fac. Sc. Paris*. Gouv. Gén. Algérie ; Dir. Serv. Colon. et Hydraul. Serv. Et. Sc. Pédologie, n° 1, Alger, 209 p.
- DURAND (J.H.), 1949. — Formation de la croûte gypseuse du Souf (Sahara). *C. R. Somm. Soc. Géol. Fr.*, n° 13, pp. 303-305.
- DURAND (J.H.), 1959. — Les sols rouges et les croûtes en Algérie. *Dir. Hydraul. Equip. rural. Serv. Et. Sc., Et. Gén.*, n° 7, Alger, 188 p.
- DURAND (J.H.), 1963. — Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. V, pp. 959-968.
- EL AMAMI (S.), BALDY (Ch.), POUGET (M.), 1967. — Rénovation d'une palmeraie littorale ancienne. Etude de sa remise en culture intensive. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agr.*, Tunisie, vol. 40, fasc. 8, 42 p.
- EL FEKIH (M.), 1966. — Etude pédologique des oasis continentales du Djérid. *Sect. Et. Pédol.*, n° 289, Tunis, 138 p. multigr.
- EL FEKIH (M.), POUGET (M.), 1966. — Les sols des oasis anciennes du Sud Tunisien. *Confér. Sols Méditerranéens*, 1966, Madrid, pp. 35-42.
- ELGABALY (M.M.), NAGUIB (N.M.), 1965. — Effect of depth and salt concentration of ground-water on salinization of soil. *Symposium on sodic soils*, 1964, Budapest. *Agrokemia es Talajtan*, t. 14, suppl. pp. 369-376.
- FINATON (Ch.), 1934. — Les dépôts lagunaires et le gypse du Bassin Parisien. *Rev. Géogr. Phys. Géol. dyn.*, III, 4, pp. 357-378.
- FINATON (Ch.), 1935. — La formation des gisements salifères. *Rev. Géogr. Phys. Géol. dyn.*, III, 3, pp. 285-303.
- HAMZA (M.), 1959. — Etude pédologique de l'oasis d'El Hamma-Béchema. *Sect. Et. Pédol.*, n° 160, Tunis, 42 p. multigr.
- HOLDERBACH (L.), 1964. — Exposé des méthodes d'analyses de sol et d'eau en usage à la subdivision d'études de pédologie et d'hydrologie. *Sect. Et. Pédol.*, ES n° 48, Tunis, 95 p. multigr.
- KEEN (B.A.), 1936. — The circulation of water in the soil between the surface and the level of underground water. Commission des eaux souterraines. *A.I.H.S. Bull.*, n° 22, pp. 328-330.
- LE HOUEROU (H.N.), 1959. — Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. Institut de Recherches Sahariennes. *Mém. h.s.*, n° 6, Alger, 2 vol. 283+232 p.
- LE HOUEROU (H.N.), 1960. — Contribution à l'étude des sols du Sud Tunisien. *Ann. agron.*, 11, 3, pp. 241-308.

- NOVIKOFF (G.), 1961. — Contribution à l'étude des relations entre le sol et la végétation halophile de Tunisie. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron.*, Tunisie, vol. 34, 339 p.
- PASCAL (P.), 1958. — Traité de chimie minérale. *Masson et Cie*, Paris, t. IV, pp. 420-438.
- PAULING (L.), 1963. — Chimie générale. Dunod, Paris, 727 p.
- PIERPOINT (G.), FARRAR (J.L.), 1966. — The equipotential zone above the water table. *Can. J. Soil Sci.*, vol. 46, pp. 121-132.
- POUGET (M.), 1965a. — Etude pédologique de la zone Gabès-Nord. *Sect. Et. Pédol.*, n° 246, Tunis, 76 p. multigr.
- POUGET (M.), 1965b. — Mesure d'humidité sur les échantillons de sols gypseux; *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 2, pp. 139-148.
- POUGET (M.), 1965c. — Etude pédologique des oasis de Gabès. *Sect. Et. Pédol.*, n° 274, Tunis, 64 p. multigr.
- POUGET (M.), 1966a. — Etude pédologique des oasis de la presqu'île de Kébili et du groupe Mansoura. *Sect. Et. Pédol.*, n° 300, Tunis, 77 p. multigr.
- POUGET (M.), 1966b. — Etude pédologique de l'oasis de Kriz. *Sect. Et. Pédol.*, n° 299, Tunis, 20 p. multigr.
- POUGET (M.), CHOVEL (W.), HUNZINGER (J.), 1966c. — Etude pédologique des oasis de Gabès-Nord et leurs extensions. *Sect. Et. Pédol.*, n° 301, Tunis, 68 p. multigr.
- POUGET (M.), 1966d. — Utilisation des eaux de la nappe du continental intercalaire : région d'El Hamma. *Sect. Et. Pédol.*, n° 307, Tunis, 21 p. multigr.
- POUGET (M.), 1967a. — Etude pédologique des oasis de Zarzis. *Sect. Et. Pédol.*, n° 316, Tunis, 29 p. multigr.
- POUGET (M.), 1967b. — Etude pédologique de l'île de Djerba. *Sect. Et. Pédol.*, n° 320, Tunis, 53 p. multigr.
- POUGET (M.), 1967c. — Reconnaissance pédologique dans la région de Douz. *Sect. Et. Pédol.*, n° 1077/E, Tunis, 12 p. multigr.
- RUELLAN (A.), 1966. — Sols isohumiques et accumulation du calcaire en Basse Moulouya et dans l'ensemble du Maroc. Description, pédogenèse et classification. Doc. ronéot. communiqué par l'auteur, 167 p.
- SCHOELLER (H.), 1958. — L'interprétation des analyses chimiques des eaux salées. Les problèmes de la salinité dans les régions arides. Actes du Colloque de Téhéran. UNESCO. *Recherches sur la zone aride*, XIV, Paris, pp. 61-71.
- SCHOELLER (H.), 1962. — Les eaux souterraines. *Masson et Cie*, Paris, 642 p.
- SOURDAT (M.), 1960. — Etude pédologique des périmètres de Bir Chenchou et Djebel Dissa. *Sect. Et. Pédol.*, n° 178, Tunis, 70 p. multigr.
- SOURDAT (M.), 1962. — Etude pédologique de Sidi-Mehebéd Zone Sud. *Sect. Et. Pédol.*, n° 257, Tunis, 106 p. multigr.
- TOLCHEL'NIKOV (Yu. S.), 1962. — Calcium sulphate and carbonate neoformations in sandy desert soils. *Soviet Soil Sci.*, n° 6, pp. 643-650.