

LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX ACTUELS DE NAPPE

DANS LE SUD TUNISIEN

-oOo-

M. POUGET

E R R A T A

Pages	Lignes	
5	I4	assurent au lieu de assure
I0	22	faibles au lieu de faible
II	8	élevées au lieu de élevée
I2	3	gastéropodes au lieu de gatéropodes
I8	9	sulfate au lieu de surfate
I9	dernière	solubilité au lieu de solution
I9	5	l'action au lieu de l'actions

P L A N

I - INTRODUCTION.

II - FACTEURS DE LA PEDOGENESE.

- I - Climat.
- 2 - Matériau originel.
- 3 - Localisation dans le paysage.
- 4 - La nappe phréatique.
- 5 - Végétation.

III - CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES.

- I - Profil n° 9 bis KRIZ.
- 2 - Profil de la parcelle d'essai de Bou Chemma.
- 3 - Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques.

IV - FORMATION DES ENCROUTEMENTS GYPSEUX DE NAPPE.

- I - Conditions chimiques de solubilité et dépôt du gypse.
 - a) - Solubilité du gypse.
 - b) - Dépôt du Gypse.
 - c) - Cycle saisonnier de dépôt.
- 2 - Evolution et morphologie du dépôt gypseux.
 - a) - Esquisse d'un processus d'évolution du stade amas jusqu'à l'encroûtement.
 - b) - Morphologie du dépôt.

V - CONCLUSIONS.

-oO-

Remarque : Ce texte a été rédigé à partir de l'étude : "Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud Tunisien", à paraître dans les cahiers de Pédologie de l'ORSTOM.

I - INTRODUCTION.

Il y a cent ans, en 1868, PICART avait déjà observé au Sahara "des sols sableux couverts plus ou moins par une croûte épaisse de gypse qui protège le sol contre l'action destructive du vent". Il expliquait sa formation par "l'évaporation des solutions du sol montant par les capillaires à la surface".

Plus récemment, DURAND a décrit les encroûtements gypseux comme des grès à allure scoriacée allant jusqu'à 1,50 m d'épaisseur, plus durs à la partie supérieure qu'à la base. Ils se forment dans les sables au contact d'une nappe peu profonde faiblement salée et riche en sulfate de calcium : le dépôt de gypse se faisant à la surface par simple concentration par évaporation de la solution.

Pour le Professeur KOVDA, le mécanisme permettant la précipitation du sulfate de calcium à partir de la solution du sol réside dans les variations de concentration de cette solution (précipitant les sels les moins solubles, calcaire à la base du profil, gypse et enfin les chlorures et sulfates très solubles à la surface) et les variations saisonnières des hauteurs de la nappe.

Si effectivement, on observe très souvent une accumulation de gypse avec induration dans l'horizon au-dessus de la nappe, il peut très bien y avoir accumulation sans induration et même, dans un matériau préalablement gypseux, forte induration pour une accumulation relativement faible. Notre propos est d'apporter quelques éléments dans l'étude de la dynamique actuelle du gypse

(solubilité, précipitation et évolution du dépôt) en relation avec la présence d'une nappe phréatique salée à faible profondeur. Pour cela, nous envisagerons d'abord dans une première partie les facteurs de la pédogenèse (climat, matériau originel, répartition géographique et topographique, nappe phréatique et végétation). En second lieu, nous préciserons les caractères morphologiques et physico-chimiques avec la description de deux profils. Enfin, sera proposée une esquisse de la dynamique du gypse, son dépôt et son évolution vers un encroûtement gypseux de nappe.

II - FACTEUR DE LA PEDOGENESE.

1 - Climat.

Sous le vocable du Sud-Tunisien, on envisage l'ensemble de la région située au Sud d'une ligne Sfax-Gafsa, entre un peu moins de 35° et 31° de latitude.

La pluviométrie dont la moyenne se situe entre 50 et 200 mm 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 peut enregistrer des pluies de 50 à 100 mm en quelques heures.

La température moyenne annuelle est comprise entre 19 et 22° C. Les moyennes mensuelles enregistrent de gros écarts entre l'été et l'hiver. Ainsi à Tozeur la moyenne mensuelle de Janvier est 10°5 pour 32°5 en Juillet.

L'ETP journalière estivale atteint facilement 7 à 10 mm et beaucoup plus par temps de sirocco. Les vents violents de toutes les directions contribuent à augmenter l'évaporation avec une insolation toujours élevée. Leur action se manifeste aussi par un intense transport de sable.

L'ensemble de la zone est classé dans les étages climatiques aride et saharien. Le drainage calculé, d'après la formule de HENIN et AUBERT pour déterminer la quantité d'eau qui draine dans le sol est nettement inférieur à 30 mm (de l'ordre de quelques millimètres). Les sols se trouvent dans la zone des sols désertiques à croûte gypseuse et saline.

2 - Matériau originel.

Le gypse est omniprésent dans la plupart des couches géologiques, du Trias inférieur au Mio - pliocène, qui forment le socle de cette région. D'autre part, d'énormes réserves de gypse se sont concentrées au cours des différentes périodes du quaternaire dans les dépressions fermées : Chotts Djerid, Rhatsa, Fedjedj et Sebhas. Leur accumulation est la résultante de l'érosion par ruissellement depuis des bassins versants gypseux et de l'arrivée en surface des eaux profondes elles-mêmes salées (COQUE 1962). 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 constituent un matériau de choix pour permettre la formation d'encroûtements gypseux si par ailleurs ils sont soumis à l'action d'une nappe phréatique à faible profondeur.

D'une façon générale, les encroûtements se forment pratiquement toujours dans des dépôts à texture légère (sable grossier à limon sableux) d'origine alluviale ou éolienne comme les sables dunaires non gypseux très calcaires en bordure de mer (Ujerba), les sables dunaires siliceux, peu calcaires en bordure du Grand Erg Oriental (Douz) etc...

3 - Localisation dans le paysage.

La permanence d'une nappe peu profonde (0 - 3 mètres) étant indispensable, ils ne pourront donc se localiser que là où cette nappe peut exister, c'est-à-dire dans les zones basses à mauvais drainage externe. Mais la pluviométrie ne peut seule expliquer le maintien de la nappe tout au long de l'année

sous un climat aussi aride. Une alimentation continue dans le temps par des apports d'origine profonde (sources, émergences, forages) reste nécessaire. Ainsi donc, les encroûtements gypseux de nappe se localisent en aval de ces arrivées d'eau, d'abord sur pente plus ou moins faible et ensuite dans les bas-fonds mal drainés.

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.

4 - La nappe phréatique.

La profondeur de la nappe suit un rythme saisonnier d'amplitude variable.

En été, la profondeur augmente en relation avec une pluviométrie nulle, une évaporation et une activité racinaire alors intenses en même temps qu'une température plus élevée du sol 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 reste plus faible dans les bas-fonds et atteint facilement 1 mètre dans les zones en amont.

La salure de la nappe est très variable de quelques grammes par litre à plus de 100 g/l de résidu sec.

La végétation constitue un des facteurs principaux de minéralisation de même que la nature du sol et la topographie. 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.

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, sulfate de magnésium et sodium, chlorure de magnésium et bicarbonate de calcium toujours en très faible proportion.

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 des 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 celle de l'eau de mer où $\text{Cl} \rangle \text{SO}_4 \rangle \text{CO}_3$ et $\text{Na} \rangle \text{Mg} \rangle \text{Ca}$.

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-après 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'origine profonde et la nappe correspondante.

L I E U	Résidu mg en g/l	Milliéquivalents / 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	2,1	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 puits busé n° 7)	9,200	30,0	40,0	65,5	53,0	73,4	8,3	0,7	2,4

—○○○○○○○○—

On observe souvent 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).

Il est possible, avec les diagrammes semi-logarithmiques de SCHOELLER de voir si la saturation en gypse est atteinte, on vérifie ainsi que toutes les nappes phréatiques où se forme un encroûtement gypseux sont saturées en gypse et cela pour des résidus secs très variables allant de 3-4 g/l à plus de 30-50 g/l.

5 - Végétation.

Il n'y a pas de végétation spécifique des encroûtements gypseux car les autres caractéristiques du profil (salure, hydromorphie et texture) interviennent. Ainsi on observe un mélange de plantes halophiles (*Arthrocnemum*, *Aerolopus littoralis*, *Limonium tunetanum*), gypsophiles (*Frankenia thymifolia*, *Limonium pruinosum*, *Zygophyllum album*), hydrophiles (*Juncus maritimus*), et psammophiles (*Imperata cylindrica*, *Plantago albicans*).

Dans les oasis, les palmiers au système racinaire profond et très souvent puissant jouent un rôle très important.

L'influence de la végétation est primordiale dans la dynamique du gypse car elle est responsable pour une large part de la concentration des solutions du sol. D'autre part, le dégagement du gaz carbonique provoqué par la respiration des racines intervient dans le dépôt du gypse. La morphologie du

dépôt reste en relation étroite avec la végétation comme nous le noterons par ailleurs.

III - CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES.

Nous décrirons successivement deux profils ou l'encroûtement se forme d'une part dans les horizons de surface (profil 9 bis de Kriz) avec une nappe peu profonde et à faible amplitude saisonnière de niveau. D'autre part, le profil de la parcelle d'essai du Bou Chemma illustrera un encroûtement gypseux se formant dans les horizons de profondeur avec une nappe dont le niveau varie beaucoup entre l'été et l'hiver.

I - Profil n° 9 bis à Kriz.

Zone salée formant une légère cuvette en bordure aval de l'oasis de Kriz. Topographie sensiblement plane s'abaissant régulièrement en direction du Chott Djerid. Végétation : *Juncus maritimus*, *Arthrocnemum*, *Aerolopus 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 (I à 2 mm) horizontaux. 2,5 Y 7/2 (sec) jaune-gris, limono-sableux, particulaire, peu poreux, consistance et cohésion faible, racines et radicelles, humide.

6 - 18 cm : Gris beige clair 2,5 Y 8/2 (sec), limono-sableux, particulaire, porosité faible, consistance et cohésion faible, présence de minces filets rouille en festons, racines, humide.

- 18 - 30 cm : Brun pâle IO YR 8/4 (sec) limono-sableux, très nombreux amas gypseux blanchâtres "farineux" friables ; porosité tubulaire moyenne, consistance et cohésion faible, racines, humide.
- 30 - 45 cm : Croûte gypseuse de nappe, brun pâle avec à la base plages noirâtres ferrugineuses. IO YR 8/3 (sec) sableux, structure "feuilletée", pores assez nombreux (I à 3 mm de diamètre), consistance et cohésion élevée, pas de racines, humide.
- 45 - 60 cm : Jaune-beige, IO YR 8/4 (sec) avec trainées ocre à noires et concrétions ferrugineuses de I cm de diamètre, sableux, particulaire, meuble, pas de racines, très humide, - limite nette avec l'horizon supérieur.
- 60 - 90 cm : Jaune-beige clair avec trainées noires à bords nets ou flous de plusieurs centimètres carrés, plus nombreuses à la base :
IO YR 7/3 (sec) pour l'horizon.
IO YR 3/4 à IO YR 2/2 pour les trainées,
sableux, structure particulaire, meuble, pas de racines, très humide.
- 90 - II5 cm : Pseudogley, jaune-beige, vert, ocre et gris IO YR 6/3 (sec) sableux, structure particulaire, meuble, très humide.
- > II5 cm : Gley, texture hétérogène avec passage sablo-argileux

(5 Y 7/I 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 en m-mhos/cm	Milliéquivalents par 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 en cm	Granulométrie					pH 1/2,5	Calcaire %	Gypse %	Mat. Org. %	Conductivité m-mhos cm	Sels solubles Extrait de saturation en mé/1					Fe ₂ O ₃ %		
	A	L	STF	SF	SG						Cl	CO ₃ H	SO ₄	Ca	Mg	Na	li- bre	to- tal
	0- 6	10,0	25,0	29	25						6	8,45	10,4	48,0	1,80	108,0	1282	2,4
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	39,0	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 et saturée en gypse, reste à faible profondeur même en été où elle se trouve au niveau du gley.

2 - Profil de la parcelle d'essai de Bou Chemma.

Décrit dans la note : "Les sols salés de Tunisie".

3 - Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques.

Schématiquement, on observe trois stades morphologiques ; amas, encroûtement et croûte parfois associés dans un même profil.

Les amas gypseux se présentent comme un assemblage lâche de très fins cristaux. Leur taille varie de 0,5 à 2-3 cm de diamètre et leur densité dans l'horizon est aussi très variable. Généralement blanchâtres, leur couleur dépend pour beaucoup de l'état d'humectation du profil.

L'induration du centre de l'amas en une petite masse cristalline translucide (au toucher analogue à un grain de sable grossier) traduit un autre stade appelé : amas consolidé ou granulé.

La distinction difficile entre la croûte et l'encroûtement repose surtout sur un critère agronomique (pénétration ou non des racines).

Elle implique cependant une induration et une compacité plus élevée pour la croûte. La couleur des encroûtements ou des croûtes est généralement blanchâtre à l'état sec. Leur épaisseur varie de 10 à 150 cm et plus.

L'encroûtement, surmonté d'un horizon d'amas est au-dessus de la croûte lorsqu'il se forme dans les horizons de surface. Il y a une limite assez nette entre la base de la croûte et l'horizon sous-jacent.

Lorsque l'encroûtement se forme dans les horizons de profondeur, la croûte se trouve le plus souvent à la partie supérieure de l'horizon encroûté. En fait, il y a beaucoup de variantes à ces schémas:

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. Ceci 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. 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.

Un profil type est difficile à définir car plusieurs cas sont possibles suivant la saison, la hauteur de la nappe, le niveau de formation de l'encroûtement. Mais 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.

IV - FORMATION DES ENCROUTEMENTS GYPSEUX DE NAPPE.

Le gypse se présente dans le sol sous les deux phases solide et liquide.

En phase solide, il est cristallisé en cristaux de taille extrêmement variable. Parfois ce gypse en petits cristaux lenticulaires (0,5 à 2mm de diamètre) passe complètement inaperçu dans certains horizons humifères de profils d'oasis, et ceci malgré un taux de gypse compris entre 50 et 60 % (sable éolien gypseux). Généralement, le gypse s'individualise en pseudomycelium, amas, encroûtement et croûte, cristaux "type rose de sable" dans des horizons sableux initialement non gypseux.

En phase liquide, sa présence se manifeste par une certaine quantité d'ions Ca^{++} et SO_4^{--} en raison de sa solubilité relativement élevée de l'ordre de 2 g/litre.

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 dans une solution saturée en gypse.

Pour cela, il convient de préciser quelles sont les conditions chimiques de solubilité et dépôt de gypse pour étudier ensuite l'évolution et la morphologie du dépôt gypseux.

I - Conditions chimiques de solubilité et dépôt du gypse.

a) - Solubilité du gypse:

Dans l'eau pure, la solubilité du gypse est de l'ordre de 2 g/l.

Elle varie suivant la température (maximum vers 35-40 ° C) en restant aux environs de 2,1 g/l. A 10°, elle n'est que 1,93 g/l.

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

Le produit de solubilité Kps 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

$$a = f.C$$

d'où :

$$Kps \text{ CaSO}_4 = [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] \cdot f \text{ Ca}^{++} \cdot f \text{ SO}_4^{--}$$

En ajoutant des chlorures à une solution saturée de gypse, la force ionique μ de la solution augmente (elle mesure la tension du champ électrique) et le coefficient d'activité diminue. Le produit de solubilité restant constant pour une température donnée, le produit $[\text{SO}_4^{--}] [\text{Ca}^{++}]$ augmente donc aussi la solubilité du gypse.

La solubilité du gypse augmente jusqu'à 7 g/l dans les solutions contenant environ 120-130 g/l de chlorure de sodium ou magnésium.

L'action des sulfates de sodium et magnésium se manifeste par une

diminution de la solution du gypse sous l'effet d'ion commun. Le produit des concentrations des ions $[SO_4^{--}] [Ca^{++}]$ devient supérieur au produit de solubilité du sulfate de calcium dont une partie précipite.

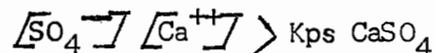
L'actions du pH demeure négligeable car le pH étant toujours supérieur à 7, l'augmentation de solubilité du gypse en milieu acide (formations d'ions SO_4H^-) ne pouvant intervenir.

Par contre, dans une solution saturée en gypse et en calcaire, une augmentation de la tension de CO_2 (respiration des racines) permettant une nouvelle dissolution du $CaCO_3$ augmente le nombre d'ions Ca^{++} en précipite ainsi une certaine quantité de gypse dont la solubilité a diminué.

(SCHOELLER 1962 . AKHVLEDIANI 1963 . TOLCHELNIKOV 1962).

b) - Dépôt de gypse.

Théoriquement, le précipité ou dépôt du gypse se fait 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 jeunes cristallins de très petite taille. Mais 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 continue 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.

Ainsi dans la parcelle d'essai de Bou Chemma, des extractions de solutions du sol sous 16 Kg de pression dans la presse à membrane donnent les résultats suivants (dans l'encroûtement gypseux) :

Nature de l'extrait	Conductivité en m-mhos/cm	Me/l					
		Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃
• Presse	5,2	32,0	21,0	24,8	20,0	41,1	3,6
• Presse	8,6	33,0	36,0	51,5	45,0	58,3	2,6
• Extrait de saturation de l'échantillon précédent après extraction 16 Kg	4,2	28,0	18,0	13,4	10,9	42,0	1,2

- Les solutions sont saturées en gypse avec un taux de Ca^{++} sensiblement constant mais légèrement plus élevé lorsque la salure augmente.
- Pour une salure de 5,2 m-mhos-cm la teneur en Mg^{++} et Na^+ est équivalente alors que pour 8,6 m-mhos-cm il y a beaucoup plus de Na^+ que de Mg^{++} . Or, ceci correspond sensiblement aux deux sels : chlorure de sodium et sulfate de magnésium.
- Le produit de solubilité du sulfate de calcium 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 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 (8,6 m-mhos-cm) au sortir de la presse. L'analyse montre une forte diminution des sels solubles : sulfate de magnésium et surtout chlorure de sodium.

La solution tout en restant saturée en sulfate de calcium contient moins de gypse dissous et même, à 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.

En définitive, cet exemple nous montre que l'augmentation de concentration des solutions du sol s'accompagne d'une modification des équilibres ioniques qui changent à tous moments la valeur du produit de solubilité du sulfate de calcium. Lorsque la solution se concentre, le produit de solubilité augmente mais un dépôt de gypse peut se produire si le produit ionique $[SO_4^{--}] [Ca^{++}]$ dépasse la valeur du produit de solubilité. Réciproquement, lorsque la concentration diminue, le produit de solubilité diminue d'autant que l'influence du sulfate de magnésium (parfois sodium) devient relativement plus importante que celle du chlorure de sodium (parfois magnésium). Un nouvel état d'équilibre s'installe au cours duquel le gypse en excès précipite.

Les variations de salure dans un profil à encroûtement gypseux de nappe, où toutes les solutions sont saturées en gypse prennent une grande importance car elles traduisent des variations du produit de solubilité du sulfate de calcium et permettent son dépôt. En effet, si la saturation en gypse des solutions du sol est nécessaire, elle n'est pas suffisante car 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.

Au départ, une différence de granulométrie ou de teneur en gypse entre deux horizons et une texture sableuse sont autant d'éléments favorables au dépôt du gypse, de même que la végétation et les fluc-

tuations du niveau de la nappe qui introduisent ces variations de salure.

c) - Cycle saisonnier du dépôt.

Il est possible de schématiser un cycle saisonnier des conditions de dépôt du gypse aussi bien lorsque l'encroûtement se forme dans les horizons de surface que de profondeur du profil.

En été, l'évaporation et l'activité très importante des racines, liées à l'abaissement plus ou moins grand de la nappe phréatique, conduit à une augmentation de salure au niveau et à la base de l'enracinement maximum. 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 $[\overline{\text{SO}_4}] [\overline{\text{Ca}^{++}}$ 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 en libérant du gaz carbonique permet la formation de bicarbonates, donc d'ions Ca^{++} en excès, responsables de la précipitation de sulfate de calcium.

En hiver, l'évaporation et l'activité des racines diminuent. La nappe généralement moins salée remonte et contribue à diminuer la salure des horizons supérieurs plus salés. Cette diminution se traduit par un abaissement du produit de solubilité du sulfate de calcium avec changement dans la teneur relative des chlorures (NaCl et MgCl_2) par rapport aux sulfates (MgSO_4 , Na_2SO_4) ayant comme résultat une précipitation du gypse. D'autre part, la température

du sol a diminué. A Bou Chemma et à I mètre de profondeur, elle passe de 28° en été à 15°C en hiver. Dans ces conditions, le produit de solubilité s'abaisse et un dépôt de gypse se fait.

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.

2 - Evolution et morphologie du dépôt gypseux.

L'évolution du dépôt gypseux revient en fait à l'étude de la croissance des cristaux où interviennent les germes de cristallisation (donc la nature du matériau originel, présence "d'impuretés") et la vitesse de croissance (degré de saturation de la solution, variations des gradients de concentration).

Nous proposerons d'abord l'esquisse d'un processus d'évolution du stade amas jusqu'à l'encroûtement pour envisager ensuite certaines caractéristiques morphologiques du dépôt.

a) - Esquisse d'un processus d'évolution du stade amas jusqu'à l'encroûtement.

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 (de préférence près des radicules ou sur la paroi des pores tubulaires).
 - Dans les deux cas, les solutions du sol fortement saturées favorisent la formation de très nombreux cristaux contrairement à des solutions faiblement saturées qui offrent des conditions plus favorables à la production de cristaux presque parfaits.
 - Les variations au cours d'une année des conditions du dépôt en fonction de l'activité des racines, du niveau de la nappe et de la température modifient à tous moments la vitesse de croissance des cristaux qui seront donc petits et 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 consolidés ou granules. Ces granules de forme irrégulière, aplatis 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.

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 feuillets 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 : l'encroûtement.

A l'intérieur de cet encroûtement, l'humidité reste sensiblement constante et ne descend que très peu au-dessous de la capacité de rétention même en été. Le profil hydrique est "tamponné" sauf la partie inférieure qui est fonction du niveau de la nappe. Dans sa partie supérieure et dans l'horizon directement au-dessus, le profil hydrique est variable car soumis aux humectations successives (irrigations et pluies) et aux dessèchements provoqués par l'acti-

tivité des racines et par l'évaporation du sol lui-même.

Le profil de salure est analogue avec au-dessus de l'encroûtement, une salure variable souvent élevée, et dans l'encroûtement, une salure qui diminue avec la profondeur en restant généralement plus faible que dans l'horizon précédent.

Dans ces conditions, l'intérieur de l'encroûtement continue à évoluer, le gypse comme à l'intérieur d'un amas peut se déposer d'une façon de plus en plus irréversible. La perméabilité de l'horizon diminue et la densité augmente. En même temps, la croissance de l'encroûtement se fait vers le haut sous forme d'amas qui sont peu à peu absorbés par l'encroûtement qui remonte d'autant que le système radiculaire est également refoulé. A la base de l'encroûtement, les variations de salure étant beaucoup moins importantes et le profil hydrique très soumis à la nappe phréatique, les possibilités d'évolution restent plus faibles. La limite avec l'horizon sous-jacent est presque toujours nette, la croissance se faisant sans doute à la surface inférieure de l'encroûtement suivant un "front" peu épais analogue à la périphérie d'un amas induré.

En définitive, l'encroûtement en modifiant progressivement les caractéristiques physiques et chimiques de l'horizon où se fait le dépôt accentue les différences dans les profils d'humidité et de salure responsables pour une large part précisément de cette précipitation de gypse ; l'encroûtement par ailleurs continuant d'évoluer d'une façon de plus en plus irréversible. On saisit ainsi la dynamique du processus qui, une fois engagé, se suffit à lui-même si toutefois

les conditions générales du milieu restent les mêmes.

b) - Morphologie du dépôt.

La nature du matériau dans lequel se fait le dépôt (sable gypseux ou non gypseux), la végétation, la concentration et le degré de saturation de la solution du sol, les variations plus ou moins rapides des conditions chimiques de précipitation du gypse sont autant de facteurs qui, non seulement favorisent mais induisent les caractéristiques morphologiques du dépôt. Plusieurs cas peuvent être envisagés :

- Dans un matériau gypseux (sable éolien par exemple) l'encroûtement se présente, quels que soient les autres facteurs, sous l'apparence d'un grès scoriacé avec de très nombreux petits cristaux de gypse plus ou moins nets, peu individualisés. En effet, l'abondance des germes de cristallisation n'a pas permis le développement de macrocristaux. Le dépôt de gypse en valeur absolue peut être très faible du fait d'une simple redistribution du gypse à l'intérieur de l'horizon. Un tel milieu préalablement gypseux est un facteur favorable à la formation de l'encroûtement surtout s'il repose sur un matériau à texture plus fine et non gypseux (Kebili).
- Dans un matériau non gypseux, schématiquement deux faciès sont possibles en fonction de l'intervention ou non de la végétation. Dans le premier cas, la végétation tout en étant un des facteurs principaux de formation, contribue à donner un faciès microcrist-

tallisé (amas évoluant en masse "cristalline") où les cristaux type "rose de sable" ne peuvent se former. En effet, la sursaturation des solutions et la concentration deviennent trop élevées ; 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 la formation de très nombreux cristaux (rôle de germes de cristallisation).

Dans le second cas, il est fréquent d'observer au niveau de la nappe la formation de cristaux type "rose de sable" dans un sable non gypseux. La nappe est alors saturée en sulfate de calcium pour un faible résidu sec (3-5 g/l) et sa profondeur reste sensiblement constante tout au long de l'année (Djerba, Kebili, Douz et Djelfa). La taille des cristaux de ce type que nous avons généralement observés varie de 0,5 à 10 cm. environ. Ils peuvent être isolés ou au contraire plus ou moins soudés entre eux formant un véritable encroûtement. Les conditions de formation de ce type de cristaux nécessitent :

- un milieu "aéré" sableux non gypseux et "propre" (sans impuretés),
- une solution du sol faiblement concentrée et saturée en sulfate de calcium car les formes de cristallisation ont tendance à se compliquer de plus en plus avec la présence d'autres ions et la sursaturation,

- un régime 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. En effet, en règle générale les faces de cristaux qui augmentent le plus sont celles qui croissent lentement.

La permanence d'une nappe faiblement salée et sulfatée provenant d'émergences artésiennes dans les sables dunaires siliceux non gypseux (Sud du Chott Djerid, peut-être également région du Souf) a pu déterminer la formation des croûtes très grossièrement cristallisées que l'on observe. L'abaissement du niveau statique les a faites "remonter" vers la surface d'autant que l'érosion éolienne les a parfois dégagées plus ou moins complètement.

Entre ces deux cas extrêmes, on observe des faciès intermédiaires où interviennent plus ou moins la végétation, la concentration et les variations de conditions de sursaturation de la solution.

En ce qui concerne l'induration, s'il est vrai qu'elle est souvent fonction de l'état de dessiccation (un bloc d'encroûtement durcit lorsqu'il est laissé à l'air), elle n'est pas en relation directe avec la teneur en gypse de l'encroûtement ou de la croûte. Elle semble d'avantage liée à une forte densité traduisant un stade d'évolution avancé où la "masse cristalline" est devenue de moins en moins soluble et a occupé pratiquement la totalité de la porosité

disponible, expliquant ainsi que l'humidité dans de tels horizons ne varie que très peu autour de la capacité de rétention.

V - CONCLUSIONS.

Dans la classification utilisée actuellement en France (AUBERT 1965) les sols à encroûtement gypseux de nappe se répartissent dans les 2 classes des sols halomorphes et hydromorphes.

- Sols Halomorphes.

S/Classe I : Sols à structure non dégradée.

Groupe : Sols salins.

La texture légère et l'omniprésence du gypse dans la solution du sol ne permettent pas d'envisager une alcalinisation possible.

S'il est facile de les intégrer aux deux sous-groupes : Sols salins à encroûtement salin superficiel (encroûtement gypseux dans les horizons de surface) et Sols à horizon superficiel friable (la plupart des sols à encroûtement gypseux en profondeur) il nous paraît intéressant de proposer un nouveau sous-groupe. En effet, l'encroûtement constitue une caractéristique essentielle du profil où le chlorure de sodium, en particulier, joue un rôle important dans la dynamique du gypse. Ce sous-groupe pourrait, éventuellement, être le suivant :

- Sols salins hydromorphes à amas et encroûtement gypseux de nappe.

- 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, les horizons de surface n'étant pas ou que très faiblement salés. On distingue souvent dans ce groupe deux sous-groupes :

- à amas et nodules,
- à encroûtement ou croûte gypseuse.

Dans un profil à encroûtement gypseux, la nappe et les solutions du sol sont saturées en sulfate de calcium avec des taux de gypse dissous différents, fonction de la valeur du produit de solubilité, lui-même en relation avec la salure (teneur en chlorure et autres sulfates). Si le dépôt de gypse se fait par concentration des solutions du sol, suivant un mode classiquement admis, une diminution de leur concentration, tout en restant saturées en sulfate de calcium, se traduit par un abaissement du produit de solubilité du gypse qui précipite. La permanence dans un même horizon des conditions de dépôt tout au long d'une année permet effectivement une précipitation du gypse qui déclenche un autre processus allant du stade amas jusqu'à l'encroûtement et la croûte.

La texture et la nature du matériau dans lequel se fait le dépôt, la végétation et les variations saisonnières du niveau de la nappe interviennent dans la formation et les caractéristiques morphologiques de l'encroûtement.