

# Les différents faciès d'accumulations calcaires dans la région orientale de la péninsule du Cap-Bon (Tunisie septentrionale)

P. BLANCANEUX (1) (2), B. HOUMANE (2), T. GALLALI (2)

(1) Pédologue ORSTOM - (2) Laboratoire de Pédologie, Faculté des Sciences de Tunis.

## RÉSUMÉ

*A partir d'observations morphologiques et d'analyses microscopiques, les auteurs décrivent les organisations verticales et latérales de différents faciès d'accumulations calcaires dans des sédiments d'origine marine du Mio-Pliocène au Quaternaire. Les relations Faciès d'accumulations — Matériaux sont étudiées, en situant ces derniers dans le contexte géomorpho-pédologique local. Les dynamiques — passée et actuelle — du carbonate de calcium sont esquissées. La genèse polyphasée des « croûtes calcaires » observées est proposée dans un milieu où alternent les phénomènes de sédimentation et de pédogénèse.*

**MOTS-CLÉS :** Accumulations calcaires — Analyse morphologique — Faciès microscopiques — Organisations verticales et latérales — Dunes consolidées — Sables — Marnes — Terrasse d'oued — Pédogénèse — Sédimentogénèse.

## ABSTRACT

THE DIFFERENT « FACIES » OF CALCAREOUS ACCUMULATIONS IN THE EASTERN REGION OF THE CAP-BON PENINSULA (NORTH TUNESIA)

*From morphological observations, the authors describe the vertical and lateral arrangements of different faciès of calcareous accumulations in marine deposits from Miopliocene to Quaternary. The relationships between Faciès of calcareous accumulations/Materials are studied by situating the latter in a local and geomorpho-pedological context. The dynamics — past and present — of calcium carbonate are outlined. The polyphased genesis of the « calcrites » studied is put forward in a situation where characteristics of sedimentation and pedogenesis alternate.*

**KEY WORDS :** Calcareous accumulations — Morphological analysis — Microscopic Facies — Vertical and lateral arrangements — Consolidated dunes — Sand — Marl — Wadi terrace — Pedogenesis — Sedimento genesis.

## RESUMEN

LOS VARIOS ASPECTOS DE LA ACUMULACIÓN DE CARBONATOS EN EL SECTOR ORIENTAL DE LA PENINSULA DE CAP-BON (TÚNEZ DEL NORTE)

*A partir de observaciones morfológicas, los autores describen las organizaciones verticales y laterales de diferentes faciès de acumulaciones calcáreas en materiales sedimentarios de origen marino, desde el Mio-plioceno hasta el Cuaternario. Se estudian las relaciones Materiales — Faciès de acumulaciones calcáreas situando estas últimas en el contexto geomorfo — edafológico local. Se esbozan las dinámicas — pasada y actual — del carbonato de calcio. Se propone la génesis polifásica de las « Costras calcáreas » observadas en un medio donde alternan los fenómenos de sedimentación y de pedogénesis.*

**PALABRAS CLAVES :** Acumulaciones calcáreas — Análisis morfológico — Faciès microscópicas — Organizaciones vertical y lateral — Medanos consolidados — Margas — Terraza — Edafogénesis — Sedimentogénesis.

## INTRODUCTION

La partie orientale de la péninsule du Cap-Bon a été retenue comme l'un des quatre sites d'études du programme de recherches sur les accumulations calcaires de Tunisie (fig. 1).

Cette étude concerne la région comprise entre le littoral actuel au niveau de l'estuaire de l'oued Chiba (S. Othman) au SE, la région d'El Midda au SO, le plateau de Nekhla au NO et l'estuaire de l'oued Lebna au NE (fig. 2). Dans cette région, toutes les formations sédimentaires présentes, datées du Quaternaire récent jusqu'au Miocène en passant par les dépôts côtiers du Tyrrhénien et la mollasse jaune fossilifère de l'Astien, sont affectées à des degrés divers par l'élément calcaire qui s'individualise et/ou s'accumule au sein de ces différentes formations suivant des faciès divers et organisés.

Les travaux d'ordre géologique (ARNOULD M., 1950), pédologique (CHAUVEL A., 1961 ; BUREAU P., 1959) ou géomorphologique (GROSSE M., 1969 ; PASKOFF et SANLAVILLE, 1983) ont montré la grande extension de ces accumulations calcaires. Toutefois, si, en ce qui concerne la pédologie, des indications sont généralement données sur la profondeur de ces accumulations, le terme de « croûte calcaire », utilisé par les différents auteurs, prête à la plus grande confusion ; il englobe en effet indistinctement différents faciès d'accumulations.

Une analyse morphologique détaillée de profils de sols répartis suivant un transect SE/NO depuis la bordure littorale et orientale de la péninsule (S. OTHMAN) jusqu'aux grands plateaux tabulaires de la région d'El Midda, nous a permis de caractériser et de distinguer plusieurs types d'accumulations (1) dont l'organisation et les variations — verticale et latérale — des faciès, paraissent liées à la nature lithologique des roches-mères, à l'âge quaternaire et à la position topographique des matériaux au sein desquels elles se manifestent. Parallèlement, plusieurs formes de cristallisation du carbonate de calcium ont pu être observées au microscope optique et électronique.

## ORGANISATIONS VERTICALES ET LATÉRALES DES FACIÈS D'ACCUMULATIONS CALCAIRES

## Les accumulations calcaires dans les sables du Tyrrhénien (fig. 3)

D'ouest en est, le paysage a l'allure d'un plateau incliné jusqu'au rivage où il se termine vers 15 m

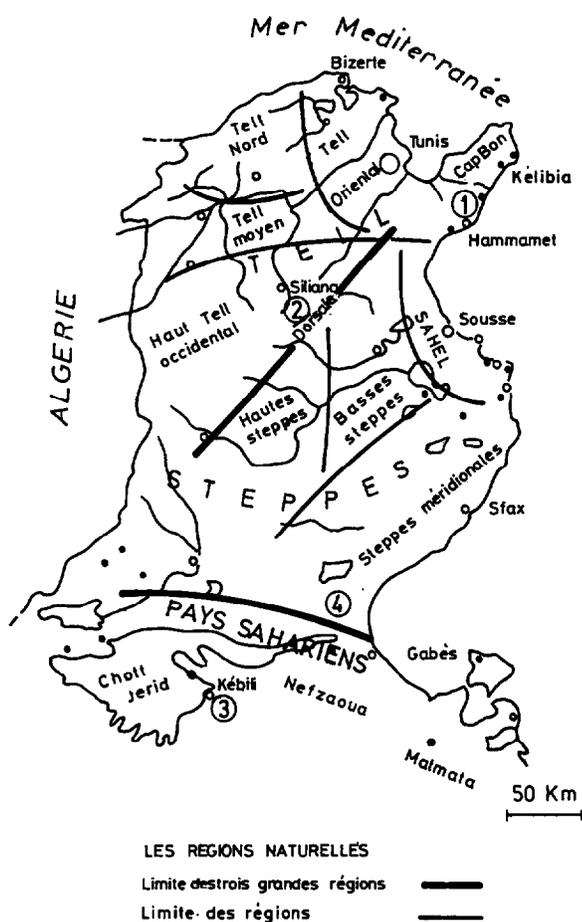


FIG. 1. — Situation des différents sites d'études des accumulations calcaires, gypseuses ou salines de Tunisie  
1) et 2) Accumulations calcaires. 3) Accumulations mixtes, calcaires, gypseuses et salines. 4) Transition calcaire (gypse)

d'altitude, limité par un cordon côtier fossile. Ce sont partout des régions basses qui ne dépassent pas 50 m d'altitude et qui évoquent l'existence d'un ancien golfe asséché. Dans ce système côtier nous distinguerons successivement d'est en ouest :

## LES ACCUMULATIONS CALCAIRES DE LA CÔTE FOSSILE

Il s'agit d'un littoral très bien conservé topographiquement avec sa dune consolidée parallèle au rivage actuel surmontant les plages « encroûtées » dites à strombes.

## a) La plage à strombes

Elle est marquée par la présence d'une « croûte

(1) La nomenclature proposée par RUELLAN (A.), 1970-1980, GILE, *et al.*, 1965-1966, est utilisée pour la caractérisation morphologique des accumulations calcaires.

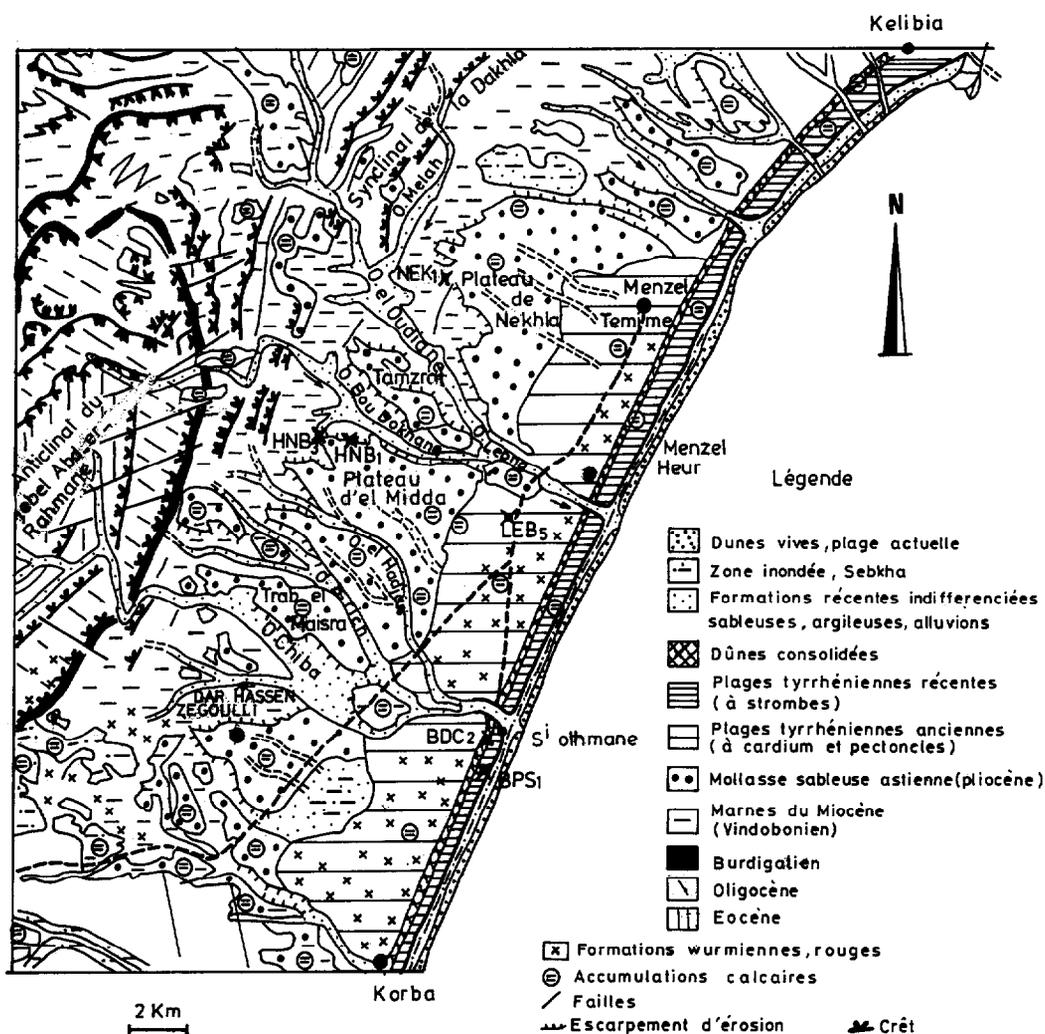


FIG. 2. — Extension et répartition des accumulations calcaires dans la région orientale de la péninsule du Cap-Bon. D'après les travaux de ARNOULD, 1950 ; CHAUVEL 1961 ; GROSSE 1969 ; complété

calcaire » qui affleure par endroits entre des zones décamétriques de sols rouges méditerranéens, selon CHAUVEL (1961), ou anciens sols isohumiques brun-rouge plus ou moins tronqués et recalcarifiés pour FOURNET (1981-1982). Profil BPS<sub>1</sub>.

La « croûte » paraît discontinue et présente un aspect mamelonné, avec des poches de dissolution et des placages de matériaux rouges entre les blocs. A sa surface, s'observent de très nombreux *Cardium*, hétérométriques (diamètre de l'ordre de 5 cm) dont les tests sont partiellement dissous. On constate une desquamation et une perforation des coquilles avec des zones de dissolution préférentielle. Ces différents éléments figurés sont liés entre eux par une phase brunâtre, carbonatée, de texture sablo-limoneuse. Le

matériau dans son ensemble est très dur et compact.

Brisés, les blocs de « croûtes » montrent au sommet une cassure conchoïdale tranchante, particulièrement au contact d'une pellicule très dure, rose-saumon, d'épaisseur millimétrique (pellicule rubanée) ; là où cette pellicule est présente, l'accumulation calcaire se montre litée avec une alternance de pellicules zonées gris jaunâtre à gris, dans des plages de matériau fin ; ces lits sont disposés le plus souvent horizontalement, mais on en observe aussi d'obliques voire même de verticaux avec des ondulations.

C'est principalement là où s'observent les « placages » de sols rouges au contact de la « croûte calcaire » que la surface de cette dernière paraît la plus altérée. On distingue alors une zone de transition avec des

invaginations de matériau rougeâtre qui pénètrent la « croûte » sous forme de micro-poches.

En résumé, les observations faites, l'état des coquilles, indiquent un remaniement sédimentaire en bord de mer en pleine régression avec apport de sédiments continentaux proches ; il y a colluvionnement sur « beach-rock » avec aussi un début de karstification côtière visible tout le long de la côte.

b) *Les dunes consolidées* (fig. 3 et 4)

Le cordon dunaire fossilisé et consolidé, s'observe parallèlement au rivage actuel, depuis Korba jusqu'à Kelibia ; il est, par endroits, morcellé en une série de petites buttes. Une observation attentive montre que pendant le maximum transgressif le trait de la côte n'a pas été fixe et qu'il a connu des oscillations comme en témoignent les coupes observées, avec au moins deux

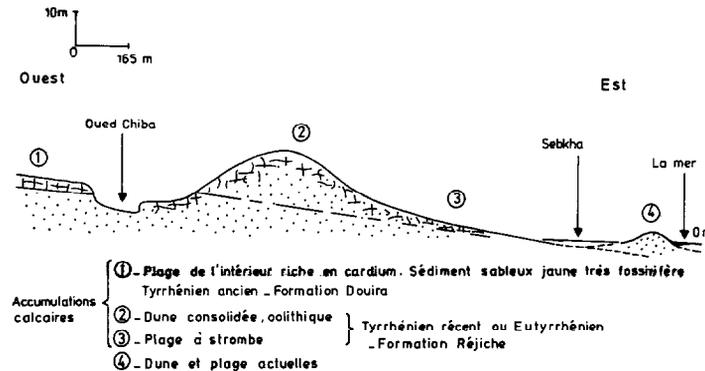


FIG. 3. — Coupe schématique ouest-est dans les formations tyrrhénienne du système côtier au niveau de l'oued Chiba

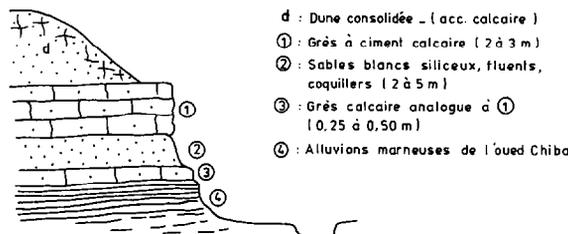


FIG. 4. — Coupe dans le Tyrrhénien au niveau de l'estuaire de l'oued Chiba

séries répétitives de grès de plages coquillers surmontés par des grès éoliens à *Helix*.

D'une façon générale le matériau dunaire consolidé est constitué de grès très calcaire, à débris d'*Helix* non marin ou de coquilles marines ; il est très compact et sert de matériau de construction, d'où l'existence de nombreuses carrières.

Le profil type des sols à accumulations calcaires dans les dunes consolidées est représenté par BDC<sub>2</sub> qui présente la succession verticale suivante (fig. 2 et 5).

**Horizon A + Kh :** de 0 à 20 cm ; colluvion - brun (IOYR4/3) ; texture sablo-limoneuse, structure polyédrique émoussée à nuciforme, moyenne à fine ; peu nette ; riche en cailloutis calcaire ; fragments de croûte ; racines nombreuses.

Transition nette, ondulée.

**Horizon Kl :** pellicule rubanée, discontinue de quelques milli-

mètres à 3 cm d'épaisseur ; constitue là où elle existe, un plancher irrégulier au système racinaire qui la pénètre grâce à un réseau d'étroites fissures.

Transition nette, ondulée.

**Horizon KCr :** de 20 à 70 cm ; « croûte calcaire » constituée par un grès coquiller à ciment calcaire ; blanc rosâtre (7,5YR8/2) ; plus ou moins structurée en feuillets ; matériau très compact ; fissures verticales et subhorizontales ; microcavités et poches de dissolution d'ordre centimétrique, fréquentes ; quelques racines, verticales.

Transition graduelle, ondulée.

**Horizon Ke :** de 70 à 180 cm ; matériau grésocalcaire, constitué de grains de quartz blancs (10YR8/2) à ciment calcaire rosâtre (7,5YR7/4) ; très riche en *Cardium* disposés en lits subhorizontaux, avec classement granulométrique ; strates jaune rougeâtre, sableuses, plus ou moins consolidées ; stratifications entrecroisées avec passées sableuses moins consolidées où le matériau a tendance à s'ébouler ; quelques racines calcarifiées ; taches calcaires.

Transition diffuse, peu nette.

**Horizon CCa :** de 180 à 250 cm ; matériau grésocalcaire ; à passées sableuses ; peu consolidé ; blanchâtre (10YR8/2) ; très riche en *Cardium* ; gros amas calcaires, fréquents ; pas de racines.

En résumé, les différentes formes d'accumulations observées rendent compte d'une individualisation relativement marquée du calcaire ; cet élément joue également un rôle essentiel dans la cimentation des sables et des coquilles. On retiendra aussi la présence d'*Helix* non marin et l'aspect de « beach-rock » du matériau.

D'autre part, et en accord avec de nombreux auteurs, entre autres RUELLE A. (1970), POUGET M. (1980-81), VOGT T. (1984), on assiste actuellement à une destruction (litholyse) de la « croûte calcaire » dans les horizons supérieurs ; cette dégradation est liée au rôle des

faune qu'ils renferment est caractéristique des espèces capables de vivre dans des milieux marins littoraux ou lagunaires susceptibles de supporter de fortes variations de salinité. Par ailleurs, la présence de Cérithes parmi les fossiles marque la ligne même de l'ancien rivage, la plage ici étant antérieure au cordon Rejiche.

C'est dans ces matériaux sableux supportant des sols rouges (méditerranéens), que se développent les accumulations calcaires les plus puissantes observées sur la bordure orientale de la péninsule. L'existence d'une tranchée de quelques kilomètres de long sur une profondeur moyenne de 3 mètres nous a permis d'observer les organisations verticales et latérales de ces accumulations calcaires dont le profil type peut être représenté par LEB<sub>5</sub> (fig. 2 et 6).

Le profil LEB<sub>5</sub> présente la succession des horizons suivante :

**Horizon A :** de 0 à 40 cm ; brun-rougeâtre (5YR3/3) ; argilo-sableux ; structure polyédrique éoussée à subanguleuse, moyenne ; — macro et micro-porosité fortes — ; débris de « croûte » ; nombreuses racines ; matière organique fréquente.

Transition diffuse.

**Horizon Kh :** de 40 à 110 cm ; nombreux fragments de « croûte » dans une matrice sablo-argileuse à limono-sableuse ; rouge (2,5YR3/6) ; nombreuses taches d'individualisation du carbonate de calcium ; pseudomycéliums, filaments et nodules calcaires inférieurs au millimètre ; structure polyédrique subanguleuse ; meuble ; forte macroporosité tubulaire, galeries racinaires anciennes ; fentes et fissures de dessiccation ; nombreuses racines, fines et moyennes, déviées horizontalement à la base de l'horizon ; matière organique directement décelable.

Transition nette, ondulée, millimétrique.

**Horizon Kl<sub>1</sub> :** de 110 à 113 cm ; premier horizon laminaire (pellicule rubanée) ; empilement de lamelles fines, roses (7,5Y8/4), gris-clair (2,5Y7/0) et rouge jaunâtre (5YR5/8), constituant un plancher irrégulier plus ou moins continu au-dessus de la « croûte » sous-jacente.

Transition nette, ondulée, millimétrique.

**Horizon KCr<sub>1</sub> :** de 113 à 145 cm ; « croûte calcaire », beige-rosé à blanchâtre (10YR8/1) avec des plages rougeâtres (2,5YR5/8 à 5/6), structurée en strates subhorizontales à allure de feuillettes ; blocs hétérométriques, décimétriques ; matériau très compact ; les racines se localisent dans les espaces subhorizontaux et/ou verticaux qui séparent les blocs de dalle et de « croûte ». Les interfaces sol/blocs de dalle sont tapissées par des pellicules rubanées, plus ou moins épaisses, disposées principalement sur leurs faces supérieures mais également sur les bords latéraux et même inférieurs de ces blocs. L'induration de la « croûte » décroît avec la profondeur.

Transition graduelle, ondulée.

**Horizon Ke<sub>1</sub> :** de 145 à 165 cm ; encroûtement nodulaire, calcaire ; structure polyédrique nodulaire en assemblage massif ; allure stratifiée et feuilletée ; matrice sablo-limoneuse à sable grossier ; riche en petits éléments calcaires qui ont tendance à constituer de petits nodules plus ou moins durcis ;

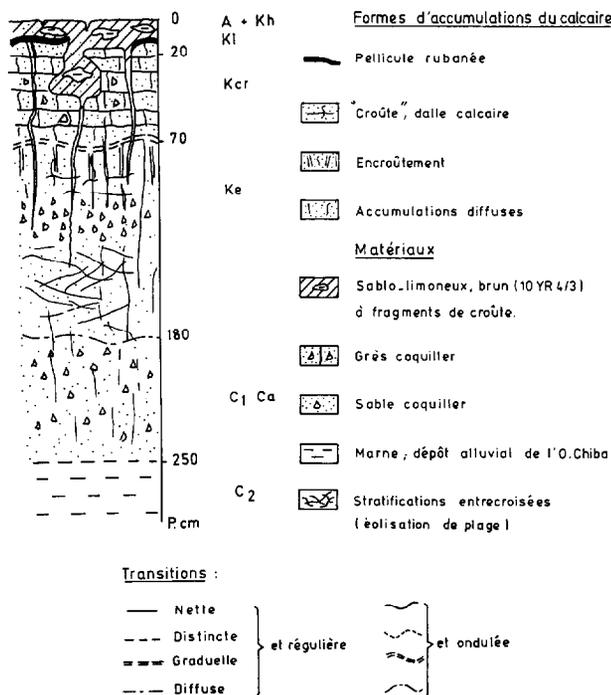


FIG. 5. — Profil BDC<sub>2</sub> — Organisation verticale des faciès d'accumulations calcaires

racines et à la dynamique actuelle de l'eau ; le bilan global étant incontestablement lié ici à un départ de calcaire. La remobilisation de cet élément se remarque également par la présence de nombreuses figures de dissolution ainsi que de racines plus ou moins calcarifiées.

Au point de vue pédologique, ces grès-calcaires consolidés, là où ils n'affleurent pas, sont recouverts par des sols calcimorphes, calcaires, soit des rendzines brunes, soit des sols bruns calcaires.

#### LES PLAGES À CARDIUM

Elles couvrent de larges surfaces dans la région orientale du Cap-Bon. Il s'agit de dépôts marins coquillers quaternaires très riches en Cardium et pectoncles qui dateraient du Tyrrhénien ancien et qui auraient été localement déformés par une tectonique ultérieure (GROSSE M., 1969 ; FOURNET A., 1981-82 ; COLLEUIL B., 1976). Ces dépôts reposent toujours sur la mollasse astienne qui n'est pas partout visible. La

pseudomycéliums calcaires ; macropores tubulaires ; quelques racines.

Transition nette, ondulée, millimétrique.

**Horizon  $Kl_2$**  : de 165 à 167 cm ; deuxième horizon laminaire ; pellicule rubanée identique à celle décrite dans le premier niveau, plus ou moins continue à la surface des blocs de dalle et/ou de croûte.

Transition nette, ondulée, millimétrique.

**Horizon  $KCr_2$**  : de 167 à 180 cm ; deuxième niveau d'accumulation calcaire ; faciès de dalle et de croûte feuilletée plus ou moins indurée ; idem à  $KCr_1$  ; pellicules rubanées aux interfaces avec  $Ke_1$  et sur les bords latéraux ; rares racines, localisées dans les espaces interfeuilletés.

Transition graduelle, ondulée.

**Horizon  $Ke_2$**  : de 180 à 210 cm ; encroûtement calcaire nodulaire ; structure plus massive au sommet ; de moins en moins dur en profondeur ; matrice sableuse à sablo-faiblement limoneuse à sable grossier ; rouge jaunâtre (2,5Y4/8) ; très riche en nodules et « poupées » calcaires, hétérométriques (les plus gros atteignent 10 cm) qui ont tendance à se disposer en strates subhorizontales ; fréquentes coquilles

de *Cardium*, prises dans des amas calcaires plus ou moins durcis.

Transition distincte, irrégulière, avec poches.

**Horizon  $Rca$**  : de 210 à 300 cm ; sable grossier, coquiller à *Cardium* prédominant ; rosâtre (5YR8/4) à jaune rougeâtre (5YR7/6) avec des passées sableuses blanchâtres ; taches et accumulations diffuses de calcaire.

Latéralement, à un mètre de distance, de part et d'autre du profil  $LEB_5$ , en  $LEB_4$  et  $LEB_6$  (fig. 6), on n'observe plus qu'un seul niveau  $KCr$  de « croûte calcaire » surmontant un encroûtement nodulaire  $Ke$  en tous points semblable aux horizons  $Ke_1$  et  $Ke_2$  précédemment décrits. On note par ailleurs en  $KCr$ , le passage latéral de la dalle à une « croûte » constituée par la superposition de feuilletés d'une dizaine de centimètres d'épaisseurs, séparés par des espaces subhorizontaux où se concentrent les racines ; chaque feuillet pouvant être partiellement ou totalement induré en dalle ; on rejoint là les descriptions faites en  $KCr_1$  et  $KCr_2$ .

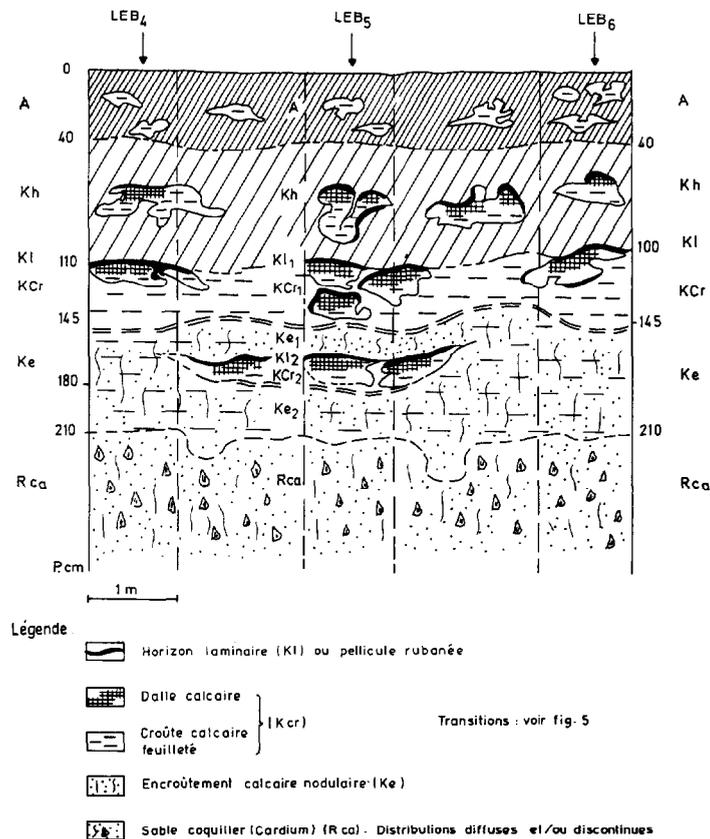


FIG. 6. — Organisations verticales et variations latérales des accumulations calcaires au niveau du profil  $LEB_5$ . Présence de deux niveaux de croûtes » à horizons laminaires, structurées en feuilletés en  $LEB_5$ , n'existant pas en  $LEB_4$  ou  $LEB_6$

### Les accumulations calcaires dans la molasse astienne

Les sables jaunes très fossilifères de l'Astien (molasse) constituent le soubassement géologique de la majorité des grands plateaux tabulaires (Oum Douil, El Midda, Tamzrat...) de la région étudiée (fig. 2). Ces plateaux, d'une dizaine de kilomètres de longueur et de quelques centaines de mètres à près de dix kilomètres de largeur se présentent sous la forme de tables inclinées qui dominent nettement les vallons qui les délimitent et les entaillent. Face aux jebels de l'Ouest, ils présentent des corniches raccordées aux vallons par un talus concave et continu sur 60 m de dénivellation en moyenne. Tous ces plateaux sont coiffés à leur partie supérieure par des accumulations calcaires plus ou moins indurées (dalles, « croûtes » et/ou encroûtements, etc.). Ces formations superficielles plus ou moins résistantes ont toutefois permis la préservation du relief et la protection des matériaux géologiques aussi facilement érodibles que le sont les molasses sablo-argileuses de l'Astien. Elles déterminent ainsi la configuration topographique actuelle des grands plateaux qui se présentent sous la forme de grands plans inclinés sur leur soubassement géologique — « allure de glacié » — secondairement morcelés par le jeu des entailles progressives du réseau hydrographique.

A la molasse astienne, sont associés soit des sols bruns calcaires, sablo-argileux sur accumulations calcaires diverses (« croûte » et/ou encroûtements) soit des rendzines, brunifiées sur « croûte érodée ». Les couleurs observées se différencient nettement du brun rouge des sols rencontrés dans les matériaux sableux tyrrhéniens du système côtier. Le profil HNB<sub>1</sub> localisé sur la bordure nord du plateau d'El Midda (Henchir en Naoulat) présente les organisations suivantes des différents faciès d'accumulations calcaires (fig. 7) :

**Horizon A** : de 0 à 20 cm ; brun foncé (7,5YR3/2) ; argilo-sableux à sable grossier ; structure polyédrique émoussée à subanguleuse ; nombreux cailloutis calcaires et fragments de « croûte », hétérométriques, jaunâtres (10YR7/8), brun très pâle (10YR8/4) et blanchâtres (10YR8/2) ; macro- et microporosité très fortes ; nombreuses racines ; matière organique fréquente ; rompus, les gros agrégats montrent des fissures et des fentes de dessiccation ainsi que des placages argileux autour des micronodules calcaires qui les remplissent.

Transition diffuse.

**Horizon Kh** : de 20 à 55 cm ; brun foncé à brun (7,5YR3/4) ; argilo-sableux à sable grossier ; structure polyédrique subanguleuse ; très nombreux fragments de « croûte » plus ou moins indurés, à pellicules rubanées ou non ; hétérométriques (jusqu'à 20 cm) ; matériau à forte macro- et microporosité ; coquilles d'escargots, fréquentes ; racines nombreuses ; ont tendance à être déviées horizontalement à la base de l'horizon Kh, au contact de la « croûte feuilletée ».

Transition nette, ondulée.

**Horizon Kl** : de 55 à 57 cm ; pellicule rubanée, discontinue, constituant localement un plancher irrégulier au-dessus de la « croûte ». Un réseau de fissures étroites permet aux racines de s'immiscer en profondeur dans la « croûte ».

Transition nette, ondulée, millimétrique.

**Horizon KCr** : de 57 à 75 cm ; « croûte calcaire » plus ou moins indurée en dalle et constituée par un empilement de « feuillets calcaires » (croûte feuilletée) ; barriolée, jaune (10YR7/8), brun très pâle (10YR7/4) et blanc (10YR8/1) ; les feuillets les plus résistants se trouvent vers la surface ; ils sont séparés par des espaces interfeuillets, disposés subhorizontalement, remplis de sols brunâtres où se localisent les racines et qui donnent une allure lamellaire à la croûte ; c'est aux interfaces sol/feuillets que s'individualisent les pellicules rubanées aussi bien verticalement qu'horizontalement. Les interfeuillets présentent çà et là des noyaux calcarifiés compacts et durs. Par ailleurs, les blocs de « croûte » observés montrent à l'œil nu des pores d'ordre millimétrique qui traduisent une certaine porosité de cette dernière. La stratification subhorizontale de l'ensemble encroûté est souligné par les couleurs différentes des feuillets qui le constituent.

Transition diffuse.

**Horizon Ke** : de 75 à 150 cm ; encroûtement nodulaire. Ce qui ressort immédiatement à l'examen du profil, c'est la présence de *gros nodules calcaires* (rognons) qui semblent disposés subhorizontalement à certains niveaux, mais qui ont une nette tendance à s'organiser verticalement sous la forme de « filons nodulaires » ; les plus gros nodules se trouvent à la base des filons, leur taille diminuant vers le sommet de l'horizon où ils se « fondent » dans l'encroûtement feuilleté sus-jacent plus ou moins induré (« croûte »). Il semble donc y avoir ici une *filiation évolutive directe* entre les nodules calcaires et la « croûte feuilletée ». Cette transition diffuse et peu perceptible à l'œil nu est soulignée par la continuité des fissures verticales de la croûte feuilletée qui se prolongent dans l'encroûtement nodulaire au contact direct des filons nodulaires. Les nodules calcaires, hétérométriques (les plus gros atteignent 20 cm de diamètre), généralement sous forme de « boules », sont composés de petits polyèdres fissurés, de couleur blanche à très blanche lorsqu'ils sont fraîchement cassés ; ils sont emballés dans un matériau sablo-limoneux à sable fin, marbré de taches blanchâtres et de plages gris clair (10YR7/2) alternant avec des plages jaune brunâtre ou jaune (10YR7/8) constituant 50 % de la matrice. On note l'abondance de traînées blanchâtres, de pseudomycéliums et de filaments calcaires qui traduisent la *mobilisation du carbonate de calcium* dans un pseudogley calcaire. Ces filaments sont localement indurés et donnent, par érosion différentielle, l'aspect d'une « grille calcaire » au milieu. Le matériau dans son ensemble est compact ; il est criblé de micropores, mais de fréquents macropores d'activité biologique (galeries racinaires, faune du sol) d'ordre centimétrique à décimétrique sont observés.

Des infiltrations de matière organique le long de galeries plongeant verticalement jusqu'à plus de 2 m sont visibles. L'encroûtement nodulaire présente un gradient de consistance vertical ; il est de plus en plus compact et dur vers le sommet. L'hétérogénéité texturale se remarque localement au sein de cet horizon par l'existence de poches sableuses très riches

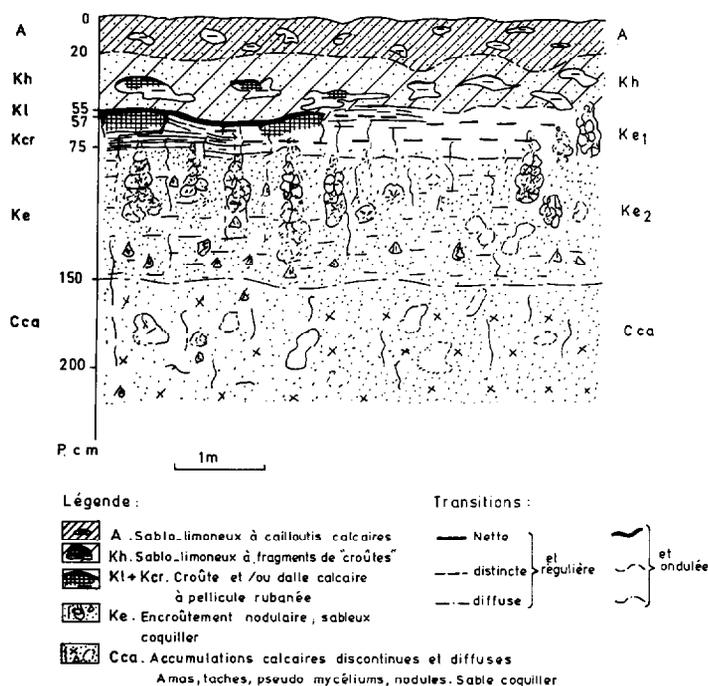


FIG. 7. — Organisations verticales et variations latérales des accumulations calcaires au niveau du profil HNB1. Disparition de la croûte feuilletée à horizon laminaire

en débris coquillers (huîtres, etc.) où s'observent des concentrations diffuses de carbonates. Certains nodules calcaires sont intimement liés aux coquilles ; des lamelles (5 cm) plus ou moins horizontales d'encroûtements calcaires plus durcis ont tendance à s'individualiser çà et là dans le matériau sableux. Quelques racines.

Transition diffuse, ondulée.

**Horizon Cca :** de 150 à 200 cm ; horizon d'accumulation et à distributions diffuses du calcaire sous la forme de particules très fines ; certaines concentrations discontinues, taches et plages « poudreuses » très blanches de carbonate de calcium, aspect de « talc » ; nodules calcaires très tendres, hétérométriques mais d'ordre centimétrique. Matériau limono-sableux à sable grossier ; structure polyédrique grossière ; couleur d'ensemble jaunâtre tacheté de blanc. Rares racines.

Latéralement, comme pour les sables du Tyrrhénien, les faciès d'accumulations calcaires décrits varient sur de très courtes distances, parfois inférieures au mètre.

La figure n° 7 illustre la disparition rapide de la « croûte » feuilletée et des encroûtements rubanés observés en HNB<sub>1</sub> et qui font place à un encroûtement nodulaire plus ou moins induré directement au contact du sol qui le surmonte. Cette variation des faciès est soulignée par le microrelief qui présente des ondulations ; les « bosses » étant déterminées localement par la « croûte » et/ou la dalle subaffleurente.

**Les accumulations calcaires des marnes vindoboniennes (fig. 8)**

Dans le synclinal de la Dakhla (fig. 2), le Vindobonien est recouvert en discordance par les formations mollassiques du Pliocène (Astien). La puissance moyenne de l'Astien qui atteint 15 à 20 m à l'est n'est plus que de 2 à 3 m dans les affleurements plus

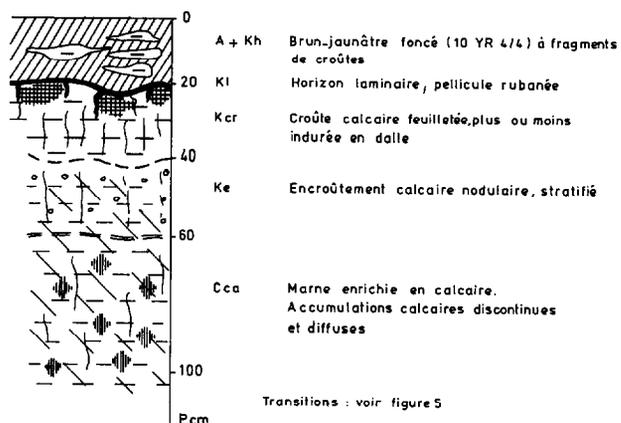


FIG. 8. — Profil NEK<sub>1</sub> — Organisation verticale des faciès d'accumulations calcaires

occidentaux jusqu'à disparaître pour faire place aux marnes.

Les marnes sont alors localement protégées par des encroûtements calcaires qui les *coiffent* comme le révèle le profil NEK<sub>1</sub> qui présente la succession verticale des horizons d'accumulations calcaires suivante :

**Horizon A + Kh** : de 0 à 20 cm ; brun rougeâtre foncé (10YR4/4) ; argilo-limoneux ; 60 % de cailloutis calcaires (fragments de « croûte », hétérométriques (jusqu'à 20 cm) ; polyédrique subanguleux à émoussé ; matière organique directement décelable ; poreux ; activité biologique forte ; racines nombreuses.

Transition nette, ondulée, millimétrique, discontinue.

**Horizon K1** : de 2 à 3 mm d'épaisseur ; pellicule rubanée, discontinue ; jaune (10YR8/8) gris rosâtre (7,5YR8/2) ; dure.

Transition nette, ondulée, millimétrique, discontinue.

**Horizon KCr** : de 20 à 40 cm en moyenne ; « croûte calcaire » ; très dure ; surface à pellicule rubanée creusée de fines cannelures et de petites cavités de dissolution ; matériau très compact, plus ou moins induré en dalle ; barriolé de plages gris rosâtre (7,5YR6/2) et blanc rosâtre (7,5YR8/2) ; nodules calcaires liés par un ciment très dur ; racines nombreuses, cheminant verticalement entre les blocs discontinus.

Transition distincte, ondulée.

**Horizon Ke** : de 40 à 60 cm ; encroûtement calcaire, nodulaire ; jaunâtre (10YR7/6) avec des plages gris rosâtre (7,5YR6/2) et blanc rosâtre (7,5YR8/2) ; plus ou moins induré ; feuilleté ; stratifié en lamelles riches en nodules calcaires durs, hétérométriques, centimétriques (allure de billes) ; matrice limono-argileuse ; assemblage massif ; ciment calcaire criblé de pores millimétriques imprégné d'un fin chevelu racinaire ; pseudomycéliums calcaires, blanchâtres.

Transition graduelle, plane.

**Horizon CCa** : de 60 à 100 cm ; marne enrichie en carbonate de calcium sous forme d'amas, de taches et de nodules plus ou moins indurés. Matériau limoneux ; frais ; structure polyédrique subanguleuse ; gros agrégats décimétriques se résolvant en plaquettes, centimétriques ; structure feuilletée lamellaire ; fentes et fissures de dessiccation ; couleur d'ensemble gris-olive (5Y5/2) avec de nombreuses plages brunes, jaunes (10YR7/6), grisâtres et blanc rosâtre ; pseudomycéliums calcaires très abondants.

Latéralement sur une dizaine de mètres à partir du profil NEK<sub>1</sub> en longeant la bordure méridionale du plateau et en se dirigeant vers le SE on observe la disparition rapide de la croûte calcaire feuilletée. Elle fait tout d'abord place à un encroûtement nodulaire plus ou moins induré, puis tendre, enfin à des affleurement de bancs gréseux redressés intercalés dans les marnes ; là où affleurent les grès, ils déterminent alors directement le relief tabulaire structural du plateau.

En résumé, on remarque donc sous un sol constitué de deux horizons A et Kh, non différenciés (A + Kh), la croûte calcaire épaisse d'une dizaine de centimètres et présentant dans sa partie supérieure la pellicule rubanée (K1) de quelques millimètres à 3 cm, formant un plancher plus ou moins continu au-dessus de la croûte ; elle est constituée de fines pellicules alternativement

grises et blanches empilées, formant une « carapace » hachée par de nombreuses fissures et présentant çà et là de nombreuses poches terreuses. Cette carapace dite parfois « zonaire » est discontinue et présente en de nombreux sites des indices d'altération et de dissolution (litholyse).

Sous-jacent à cette pellicule rubanée s'observe la croûte calcaire proprement dite, structurée en feuillets séparés par des espaces interfeuillets subhorizontaux plus ou moins anastomosés. Quelques racines s'observent dans ces espaces et ont tendance à former un filon continu subhorizontal à la base de l'« horizon KCr ». Ce niveau repose lui-même sur un encroûtement calcaire (Ke) à structure massive, localement stratifié et plus ou moins finement feuilleté à sa partie supérieure ; cette structure devient polyédrique nodulaire plus en profondeur ; les nodules calcaires hétérométriques mais centimétriques, durs, sont emballés dans une matrice calcaire criblée de pores millimétriques, de couleur blanc rosâtre plus ou moins tendre, pulvérulente à l'état sec. On passe ensuite à une zone où les niveaux d'accumulations calcaires et la roche-mère s'imbriquent. La structure géologique du matériau marneux qui était encore plus ou moins perceptible dans l'encroûtement supérieur se remarque nettement ici ; la concentration calcaire diminue progressivement avec la profondeur mais se voit dans cet horizon CCa sous la forme de gros amas, de taches et de nodules calcaires dans le matériau marno/calcaire pulvérulent à l'état sec, plus ou moins pâteux à l'état humide. C'est bien la roche-mère marneuse qui se trouve chargée en calcaire dans ses niveaux supérieurs.

A partir du profil NEK<sub>1</sub> représentatif du profil type complet, on observe *latéralement* toute une gamme de profils incomplets ; le passage de l'un à l'autre se faisant sur des distances relativement courtes, variables mais parfois d'ordre métrique. Dans tous les cas observés, c'est toujours (paradoxalement) la partie supérieure la plus dure et la plus résistante, constituée par les « croûtes calcaires » plus ou moins indurées en dalles compactes à pellicules rubanées, qui fait défaut. Ces observations morphologiques nous incitent à concevoir que dans le cas de profils incomplets, il s'agirait de profils qui, pour des raisons de fonctionnement — sans doute déterminées par les caractéristiques hydrodynamiques locales propres au milieu — n'ont pas pu arriver au « stade évolutif final » des accumulations calcaires ; ce dernier étant caractérisé par la « croûte calcaire » à carapace zonale durcie telle qu'elle apparaît en NEK<sub>1</sub>.

Comme pour les accumulations calcaires développées dans les matériaux précédents, les différents faciès déjà observés et leurs organisations tant verticale que

latérale ont pu être reconnus ; toutefois, le degré de différenciation est globalement moins perceptible dans les marnes que dans les sables de l'Astien.

On assiste également et actuellement, à la « fonte » (litholyse) des horizons supérieurs les plus riches en calcaire et à une remobilisation du carbonate de calcium au sein du matériau. De par leur position topographique (à l'amont du paysage géomorpho-pédologique régional sur le versant oriental de l'anticlinal du jebel Abderrahmane, dans la zone de soutirage du réseau hydrographique), le bilan global est actuellement à une perte de calcaire par évacuation hors des profils pédologiques.

Au point de vue pédologique, les marnes plus ou moins encroûtées sont recouvertes soit par des sols bruns calcaires plus ou moins hydromorphes, à amas, nodules, taches et concrétions calcaires dans les bas-reliefs, tandis que se développent localement des rendzines brunes là où affleurent la croûte calcaire plus ou moins érodée (NEK1).

**Les accumulations calcaires des anciens lits d'oueds fossilisés (fig. 9)**

Localement les marnes sont ravinées par des dépôts grossiers d'allure conglomératique puissamment encroûtés, en disposition linéaire, qui sont les témoins d'anciens lits d'oueds fossilisés. Ces « conglomérats » traversent parfois les croûtes et/ou encroûtements calcaires de certains grands plateaux comme celui de Tamzrat. Le passage latéral de la « croûte » au matériau conglomératique encroûté est brutal et se fait à l'échelle métrique.

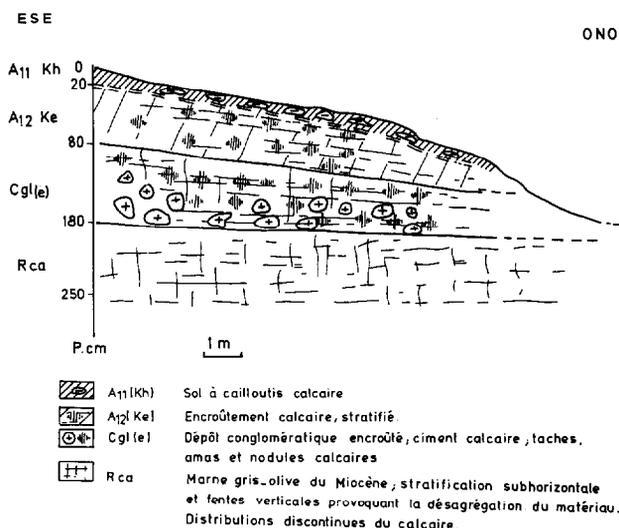


FIG. 9. — Profil HNB<sub>3</sub> — Organisations verticale et latérale des faciès d'accumulations calcaires

Le principal témoin de ces formations est observé en bordure N du plateau d'El Midda à Henchir en Naoulat (profil HNB<sub>3</sub>).

Ce profil présente la succession des horizons suivante :

**Horizons A<sub>11</sub> + Kh :** de 0 à 20 cm ; brun (7,5YR4/4) ; argilo-limoneux ; structure grumeleuse à polyédrique subanguleuse ; cailloutis calcaire, hétérométriques, très nombreux ; meuble ; macro- et microporosité fortes ; perméable ; matière organique directement décelable ; racines, fines et moyennes ; activité biologique forte.

Transition graduelle, ondulée.

**Horizon A<sub>12</sub> (Ke) :** de 20 à 80 cm. Encroûtement calcaire, stratifié ; brun jaunâtre (10YR5/4) ; argilo-limoneux ; structure polyédrique subanguleuse ; cailloutis calcaires, hétérométriques, nombreux ; taches et nodules calcaires, hétérométriques (1 mm à 10 cm), blanchâtres (10YR8/2), disposés en strates subhorizontales ; les lits superposés atteignent chacun une épaisseur moyenne de 10 cm environ ; matériau à forte macro- et microporosité ; bourré de calcaire ; filaments calcaires, pseudomycéliums, taches et nodules ; se désagrège en petits blocs polyédriques ; assemblage compact ; ferme ; racines nombreuses, verticales.

Transition nette, plane.

**Horizon C<sub>gl(e)</sub> :** de 80 à 180 cm ; dépôt conglomératique encroûté ; brun pâle (10YR6/3) constellé de plages blanches (10YR8/2) et brun jaunâtre (10YR5/8) ; blocs et galets de grès hétérométriques (jusqu'à 50 cm de diamètre), roulés mais peu usés, émoussés, de couleurs variées (gris, vert, rougeâtre, brun), à classement granulométrique montrant plusieurs phases d'apports ; emballés dans un matériau marno-calcaire, limono-argileux ; accumulations calcaires de faciès très divers (pseudomycéliums, filaments, taches, plages, amas, nodules hétérométriques, blancs) ; disposés en strates subhorizontales ; matériau à très forte macroporosité, tubulaire ; microporosité très forte dans les blocs polyédriques marno-calcaires ; fentes de dessiccation imprégnées de calcaire (pellicules et films).

Transition nette, plane.

**Horizon R<sub>ca</sub> :** de 180 à 250 cm ; marne ; gris-olive (5Y6/2) avec plages gris clair (5Y7/1) et pellicules fines, jaune brunâtre sur les bordures externes des blocs à structure lamellaire ; matériau se débitant très facilement en petits blocs polyédriques et/ou cubiques ; allure feuilletée ; fentes verticales, centimétriques ; quelques nodules calcaires, hétérométriques, s'individualisant au contact du dépôt encroûté qui surmonte la marne ; très friable, bouillant à l'état sec.

Latéralement, le matériau très consolidé peut être suivi sur une trentaine de mètres de distance ; vers le NO il se termine en corniche surplombant les marnes vindoboniennes du synclinal de la Dakhla ; vers le SE il disparaît brutalement au contact du matériau pliocène qui le surmonte. Il atteint partout où on l'observe une épaisseur plus ou moins régulière d'environ un mètre.

En résumé, le dépôt est constitué de gros galets hétérométriques de grès oligo-miocènes, d'allure roulée, peu usés, simplement émoussés sur les bords qui témoignent d'un transport sur courtes distances sous l'influence de décharges fluviales à caractère torrentiel.

Ces gros galets sont fortement consolidés par un ciment calcaire riche en grains de quartz (jusqu'à 2 cm de diamètre) qui proviennent de la désagrégation des grès qui en sont bourrés. Le calcaire se manifeste par l'individualisation des faciès très variés d'accumulations qui vont depuis les concentrations diffuses et discontinues (pseudomycéliums, revêtements, amas, taches, nodules). Dans le matériau colluvial qui surmonte le dépôt conglomératique encroûté, le bicarbonate de calcium se concentre dans des lits subhorizontaux superposés ; cette stratification des accumulations calcaires est parallèle à celle qui s'observe dans le niveau conglomératique où nodules, amas et taches s'alignent également en bandes subhorizontales. Nous avons là les indices d'*apports latéraux* notoires du calcaire par les eaux essentiellement chargées en bicarbonate de calcium. Cet élément, mis en solution à l'amont du paysage pédologique régional riche en formations calcaires, a pu cheminer dans les dépôts alluviaux grossiers (*dynamique longitudinale*) ; la très forte macroporosité du matériau, siège d'une intense évaporation a permis, lors des phases de dessiccations, le dépôt du  $\text{CO}_3\text{Ca}$  au sein du matériau.

Par ailleurs, les croûtes calcaires plus ou moins démantelées développées dans les sables de l'Astien (HNB<sub>1</sub>) en position de corniche dominant de quelques mètres le dépôt conglomératique et situées à une centaine de mètres de distance ont été et sont actuellement le siège d'une mise en solution du calcaire qui, par une *dynamique transversale* contribue à la formation de nouvelles accumulations calcaires ; ces dernières se manifestent plus particulièrement au sein du matériau colluvial qui surmonte le dépôt grossier. Ces interprétations déduites de nos observations morphologiques rejoignent celles qui ont été faites en Tunisie Centrale par BONVALLOT et DELHOUME (1978).

## ANALYSE MICROSCOPIQUE

### Accumulations calcaires dans les plages à *Cardium* (Profil LEB<sub>5</sub>)

CARACTÉRISTIQUES MICRO-MORPHOLOGIQUES (1). ÉTUDE DE LAMES MINCES AU MICROSCOPE OPTIQUE ET À LA LOUPE BINOCULAIRE

L'observation de nombreuses lames minces d'échantillons non remaniés nous permet de préciser l'organisation micromorphologique des principaux horizons.

### Horizon A

La *microstructure* est *pelliculaire* avec *ped sphéroïdal granulaire* ; le degré de pédalité est développé ; le squelette est essentiellement constitué de grains de quartz (40 à 50 %) enrobés d'une gangue argileuse ; les grains sont de couleur grisâtre (voilés), de forme anhédrale, arrondis et émoussés. L'assemblage plasmique est de type *squelsépique* ; de nombreux (20 à 30 %) méso- et macrovides d'entassement (30 à 1000  $\mu$ ), incurvés à doublement incurvés apparaissent entre les grains de quartz.

Les *lithoreliques* de croûte calcaire (0,2 à 2 mm) qui correspondent aux accumulations calcaires les plus denses et les plus indurées (pellicules rubanées, dalles fragments de croûte...) présentent un *cortex d'altération* argilo-ferreux (particules argileuses et oxydes de fer), qui à l'œil nu, donne l'aspect terreux et sali à l'intérieur des poches de dissolution des fragments de croûte. Leur taille varie de quelques centimètres à quelques dixièmes de millimètres jusqu'aux *sphérolithes de calcite* réparties çà et là dans l'horizon (calcite microcristallisée de 20 à 100  $\mu$  de diamètre environ).

### Horizon Kh

Les grains de quartz occupent ici une place également importante. Localement, le plasma argileux se concentre dans des zones plus denses, plus rougeâtres. Par rapport à l'horizon A, on assiste globalement à l'« envahissement » du squelette quartzueux par une matrice argileuse rougeâtre. L'assemblage plasmique reste de type *squelsépique*. Des *cutanes de tension* et des *néocutanes* liés aux parois des nombreux vides apparaissent.

- La *matrice pulvérulente* est principalement constituée de *sphérolithes de calcite* microcristallisée (20 à 100  $\mu$ ) pris dans une gangue rougeâtre (oxydes de fer et argiles). Des reliques de croûte calcaire et quelques quartz sont également observés à ce niveau.

- Certaines *reliques de croûte* montrent un aspect peu dense, très poreux ; elles sont constituées par un cristalliplasma micritique (inférieur à 4  $\mu$ ) — calcite microcristallisée — à partir duquel semble s'individualiser, puis se détacher les sphérolithes de calcite.

- Des *pseudomycéliums calcaires* apparaissent isolés de la matrice argilo-ferrique ; localisés dans la microporosité interagréats.

### Horizon laminaire (Kl)

Cet horizon très dense, avec peu de quartz, se montre constitué par un empilement de strates diversement colorées de calcite très finement microcristallisée

(1) Pour la description des lames minces, nous nous sommes référés au *Handbook for Soil thin Section Description*, Wain Research Publications, International Society of Soil Science, 1985.

(micrite) ; il présente une grande analogie avec les *pellicules rubanées*.

#### *Dalle calcaire*

En lame mince, elle se montre constituée par une *masse micritique* très dense avec de rares quartz, localisés. De nombreuses fissures se recoupent et semblent « disloquer » le matériau.

#### *Croûte calcaire*

Le matériau se montre constitué par un assemblage de plages plus ou moins denses et colorées, rougeâtres à rouge délavé. *Les plages les plus denses* sont remplies de quartz fragmentés, corrodés, aux bords plus ou moins anguleux recouverts de calcite. Elles présentent également de nombreuses fissures tapissées de cristaux de calcite (microsparite). A côté de ces plages, des *zones plus poreuses* et plus claires présentent de nombreux vides, parfois allongés, remplis de calcite en aiguille (lublinitite) avec relativement moins de quartz.

#### *Encroûtement calcaire*

Au microscope optique, le matériau, très complexe, présente un fond matriciel au cristalliplasma micritique rempli de vides où la calcite semble recristalliser sous des faciès très variés (sparite, aiguilles, etc.).

#### *Horizon C<sub>ca</sub>*

Divers processus de calcitisation peuvent être reconus par observation en lame mince tels la calcitisation micritique ou en aiguille dans la microporosité, ou l'épigenésation des quartz qui dans la masse de l'horizon laisse la place à des plages micritiques.

#### OBSERVATION AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE (M.E.B.)

L'observation au microscope électronique à balayage (1) (M.E.B.) de nombreux agrégats métallisés, correspondant aux différents horizons précédemment décrits, nous permet de préciser quelques faciès de calcite microcristallisée dans les principaux horizons d'accumulation calcaire ainsi que dans les *traits*

*pédologiques* révélés par les observations morphologiques (macro- et micromorphologie).

Elle nous permet également d'appréhender quelques processus de transformation en cours au sein de ces accumulations calcaires et d'approcher l'ambiance physico-chimique et le cadre d'évolution géochimique de ces dernières. C'est plus particulièrement dans les *zones de transition* des différents faciès d'accumulations calcaires (dalle, pellicule rubanées, croûte, encroûtement, amas, taches, nodules pseudomycéliums...) que les observations ont été multipliées et que les analyses à la microsonde ont permis de préciser les transformations en cours.

La cristallisation de la calcite (microcristalline) est observée sous des formes et des tailles variables *qui paraissent être en relation très étroite* avec les caractéristiques physiques (texture, porosité...) des différents faciès d'accumulations calcaires, et des matériaux au sein desquels elles s'individualisent.

C'est ainsi que :

— *La calcite sparitique*, de taille supérieure à 10  $\mu$ , qui comporte un faciès de *calcite en aiguilles* appelé parfois *lublinitite* est fréquemment observée dans la porosité de la *croûte calcaire*, dans les nombreux vides des *encroûtements calcaires* ainsi que dans les fissures et les poches de dissolution « microkarstiques » de la *croûte calcaire*. Ces aiguilles de calcite avec leur arrangement désordonné présentent parfois des formes analogues aux « nids de pie » signalés par POUGET (1980) (photos 1 et 2).

Les *aiguilles de calcite* sont également présentes dans la porosité interagrégats (photos 3, 4 et 5).

Des formes « flexueuses » de précipitation de calcite (photo 6) considérées par ESWARAN et SHOBA (1981) comme le résultat d'accumulations biogéniques dues aux champignons, ont été également observées dans les micropores de la *croûte calcaire*.

La *calcite en aiguilles* qui suppose une vitesse de

PHOTO 1. — LEB<sub>5,4</sub> (105-115 cm). Calcite en aiguilles dans les faciès à forte porosité d'un fragment de croûte calcaire en voie de dissolution. L'arrangement désordonné des aiguilles autour des micropores constitue des « nids de Pie » reconnus par POUGET (1980) pour la calcite en bâtonnets.

PHOTO 2. — Agrandissement de la photo 9. Calcite en aiguilles.

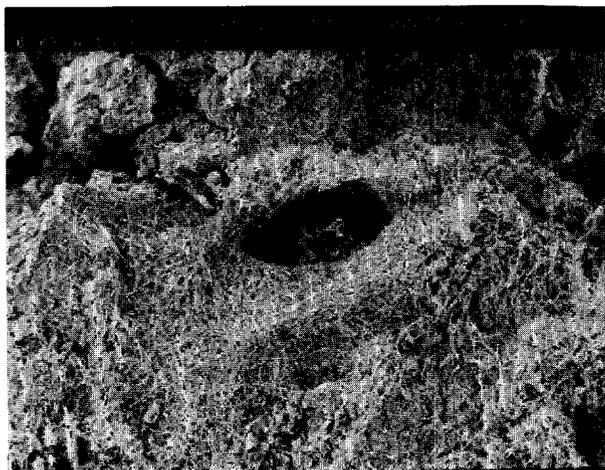
PHOTO 3. — Très forte porosité inter- et intra- agrégats du complexe organo-argilo-ferrique du sol rouge fersiallitique LEB<sub>5</sub>.

PHOTO 4. — LEB<sub>5,2</sub> (50-60 cm). Aiguilles de calcite constituant les pseudomycéliums développés dans la microporosité inter-agrégats d'un sol rouge. Reprécipitation du calcaire ; les pseudomycéliums apparaissent isolés de la matrice argiloferrique.

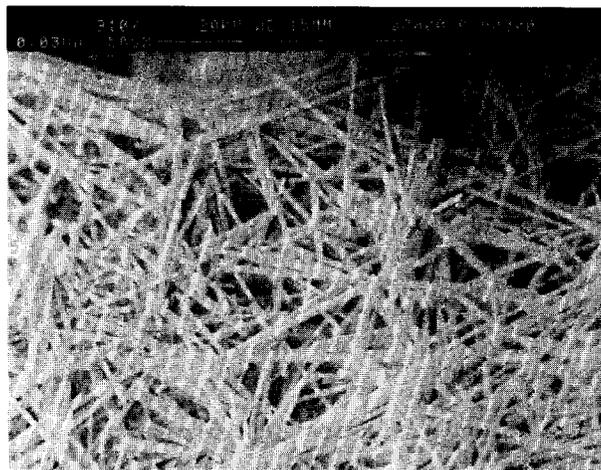
PHOTO 5. — Agrandissement de la photo 11. Assemblage d'aiguilles de calcite dans un pseudomycélium.

PHOTO 6. — LEB<sub>5,4</sub> (105-115 cm). Formes flexueuses de précipitation de calcite localisées dans la microporosité de la croûte calcaire altérée.

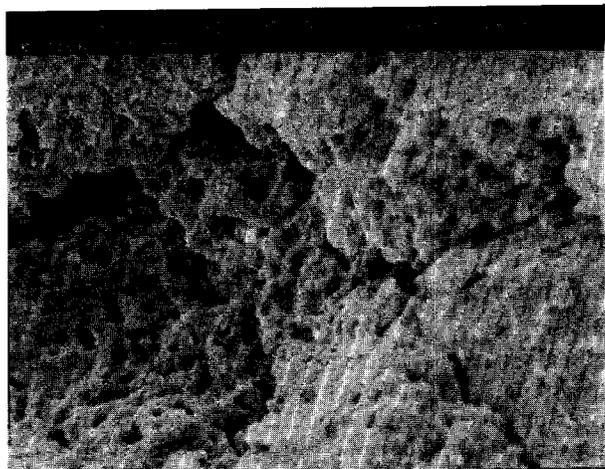
(1) Laboratoire de Pétrologie de la Surface. Ateliers de Bondy, juillet-août 1987.



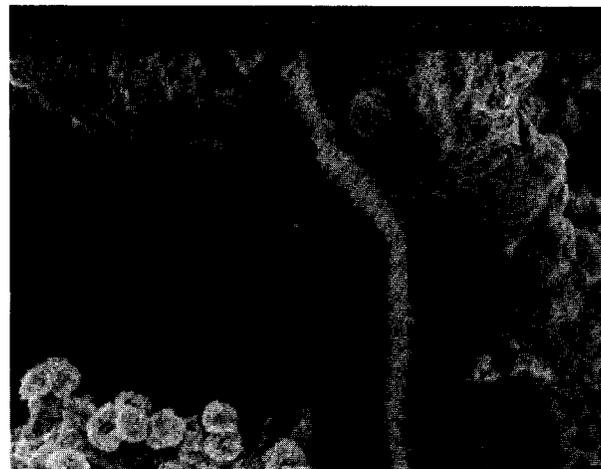
1



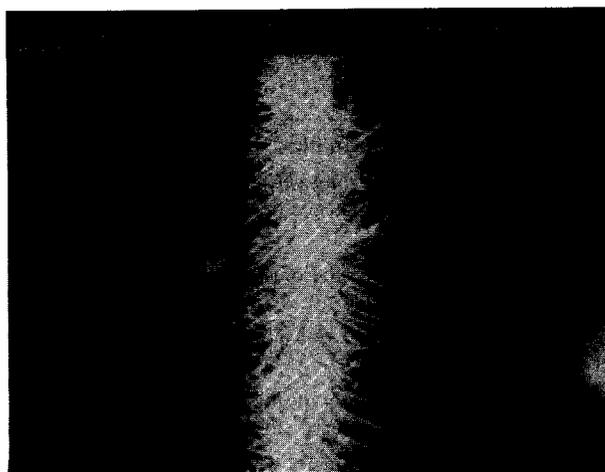
2



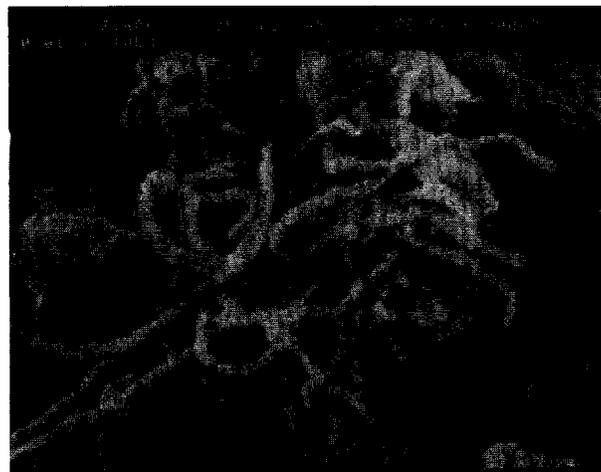
3



4



5



6

crystallisation très rapide dans des solutions fortement sursaturées peut se produire dans les macropores (diamètre supérieur à  $10\ \mu$ ) où l'évaporation est intense et où la diffusion est rapide vers la microporosité (diamètre inférieur à  $0,2\ \mu$ ) ; ces conditions sont réunies essentiellement dans les niveaux les plus poreux de la croûte calcaire.

— La calcite micritique de taille inférieure à  $4\ \mu$  a été observée sous deux faciès principaux distincts :

- La calcite en bâtonnets constituée de petits cristaux (jusqu'à  $2-3\ \mu$ ) allongés reste présente en abondance dans la forte porosité des fragments de croûte en voie de dissolution (photo 7). Les bâtonnets, de forme plus ou moins aplatis ont des tailles variables ; leur arrangement est désordonné. Ils sont également rencontrés dans les sphérolithes de calcite et dans la porosité de la matrice pulvérulente de l'horizon Kh. Ils n'ont pas été observés dans la croûte calcaire compacte, ni dans les dalles les plus dures.

- La calcite en rhomboédres. C'est le faciès le plus répandu de la calcite micritique. Les microcristaux, de tailles variables, fréquemment de l'ordre du micron ont une structure géométrique plus ou moins nette suivant les faciès d'accumulations calcaires qu'ils constituent.

C'est ainsi que dans les dalles compactes, les pellicules rubanées ainsi que dans les croûtes calcaires les plus indurées, ils présentent des formes géométriques très nettes, anguleuses (photo 8). Dans ces faciès, les cristaux de  $1\ \mu$  à  $5\ \mu$  apparaissent très fortement imbriqués les uns aux autres ce qui assure une grande cohésion d'ensemble au matériau. Des structures analogues correspondant à la calcite primaire, ont été reconnues par RICHE *et al.* (1982), au sein de roches calcaires saines au Brésil (région d'Iréce, Bahia).

Dans les niveaux sous-jacents moins indurés tels que les encroûtements calcaires nodulaires (Ke) ainsi que dans la matrice pulvérulente des encroûtements massifs plus ou moins friables, on reconnaît également l'organisation micritique, rhomboédrique ; toutefois, les

micro-rhomboides paraissent disjoints et présentent sur leurs bordures et les faces des microcavités de dissolution ; les faces externes paraissent taraudées par des micropores. A très fort grossissement, le cristalliplasma micritique montre qu'à partir des faces de dissolution des *microsphérolithes de calcite* semblent s'individualiser puis se détacher (photo 9).

L'organisation d'ensemble fait ressortir l'aspect de « fonte » globale des rhomboédres de calcite soumis à une dissolution de bordure et des faces, puis disjoints ce qui entraîne une diminution de la cohésion d'ensemble. Il y a « affaissement » des structures géométriques à mesure que diminue l'induration de l'accumulation calcaire et que l'on passe aux matériaux pulvérulents.

Ces structures géométriques émoussées se retrouvent aussi dans les gâines calcitiques qui enrobent les grains de quartz dans les zones où la croûte calcaire est en voie d'altération (photo 10).

Cette gaine de calcite micritique apparaît, à très fort grossissement (photo 11), constituée de microrhomboides disjoints, en forme d'éboulis ; les cristaux se séparent ; la porosité croît, la consistance est pulvérulente. De telles figures caractérisent les *encroûtements massifs*, friables et peu friables ainsi que les zones d'altération de la croûte calcaire où la consistance devient pulvérulente.

#### Accumulations calcaires dans la mollasse astienne (Profil HNB<sub>1</sub>)

Bien que tous les faciès d'accumulations calcaires décrits dans les sables du Tyrrhénien aient été également observés dans la mollasse astienne, nos observations microscopiques ont surtout porté sur l'organisation et la constitution des *encroûtements nodulaires* ; en effet, l'individualisation très nette de *macronodules calcaires* constitué par l'assemblage de petits polyèdres reste le fait saillant et distinct des accumulations calcaires dans ces matériaux sableux fossilifères.

PHOTO 7. — Bâtonnets de calcite de forme aplatie et désordonnés, enchevêtrés et les sphérolithes de calcite.

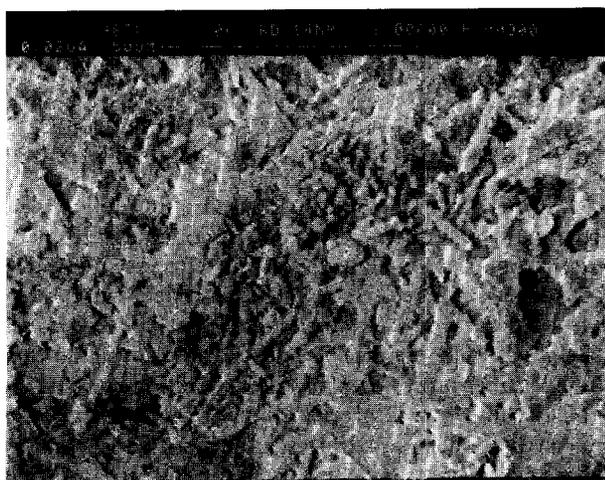
PHOTO 8. — LEB<sub>5,4</sub> (105-115 cm). Calcite micritique en rhomboédres dans un fragment de croûte calcaire non altérée, compacte et dure. Noter la structure géométrique parfaite des cristaux, leur allure anguleuse nette ; l'existence de « ponts » reliant certains cristaux entre eux, assurant une très grande cohésion à l'ensemble.

PHOTO 9. — Microrhomboides de calcite soumis à une dissolution de bordure ; naissance de sphérolithes de calcite qui semblent s'individualiser puis se détacher des rhomboédres.

PHOTO 10. — LEB<sub>5,4</sub> (105-115 cm). Gaine calcitique, poudreuse, enrobant un grain de quartz qui apparaît taraudé, piqué de petits pores de dissolution dans un fragment de croûte calcaire en voie de dissolution.

PHOTO 11. — Détail de la gaine calcitique enrobant le grain de quartz ; calcite micritique en rhomboédres émoussés en voie de dissolution : les cristaux sont disjoints. Faible cohésion d'ensemble : consistance pulvérulente du matériau.

PHOTO 12. — HNB<sub>1,4</sub> (70-80 cm). Micronodules de calcite en assemblage désordonné constituant les polyèdres élémentaires d'un macronodule calcaire.



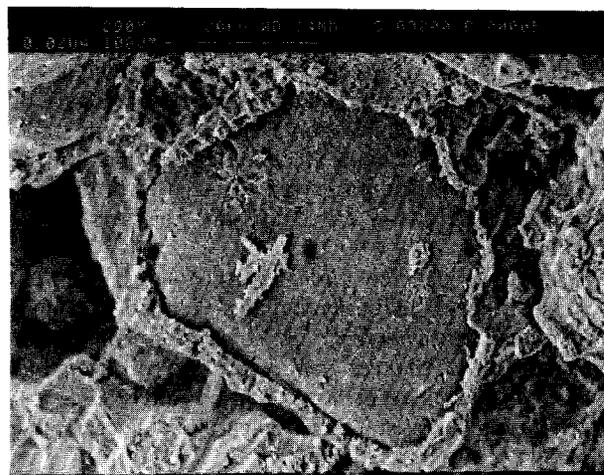
7



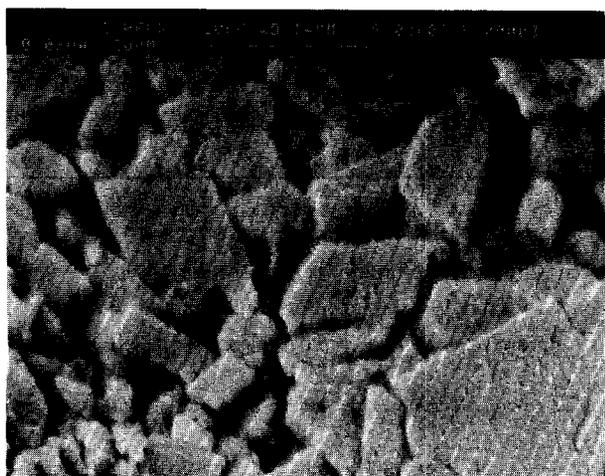
8



9



10



11



12

L'examen au M.E.B. de ces petits polyèdres montre qu'ils sont eux-mêmes constitués par un assemblage d'*éléments nodulaires* (photo 12) atteignant en moyenne 50  $\mu$ , disjoints ; chacun de ces *micronodules* est en réalité le résultat d'un amalgame désordonné de « baguettes » de calcite enchevêtrées les unes dans les autres et formant une « pelote » de calcite (photo 13). Ces baguettes sont plus ou moins reliées entre elles par des barreaux intermédiaires qui contribuent ainsi à assurer une certaine cohésion à l'ensemble. Il ressort toutefois d'un tel échafaudage ultramicroscopique une micro- et ultramicroporosité intranodulaire extrêmement forte. A plus fort grossissement, ces baguettes de calcite se montrent elles-mêmes constituées d'un assemblage de « fibrilles » de calcite — diamètre de l'ordre du micron — plus ou moins torsadées et liées les unes aux autres à la manière d'une « fibre » (photo 14). Ces « fibres calcitiques » sont plus particulièrement développées à la périphérie des micronodules calcaires où elles ont tendance à s'articuler entre elles pour constituer des « ponts » (photo 15), ce qui contribue également à la cohésion de l'ensemble et à la consistance globale du nodule ; toutefois en de nombreux points, cette cohésion demeure très fragile, le choc des électrons lors de l'examen à très fort grossissement — focalisation du faisceau d'électrons — étant suffisant pour rompre ces échafaudages.

Toutes ces formes allongées (baguettes, fibrilles, fibres, etc.) de cristallisation de la calcite rendent compte d'un milieu extrêmement poreux et très riche en calcaire où les alternances rapides de phases de dissolution et de dépôt créent des conditions favorables à la précipitation des cristaux et à une vitesse de croissance élevée de ces derniers.

A la base de l'horizon *Ke* et dans l'horizon *C<sub>ca</sub>*, des figures d'épigénie calcaire ont été observées (photos 16 et 17) — quartz épigénisés par la calcite — dans un matériau carbonaté constitué par un assemblage de microrhombes émoussés de calcite micritique, plus ou moins disjoints avec des aiguilles de calcite dans la microporosité intercrystalline (photo 18). L'ensemble du

matériau se caractérise par une consistance poudreuse et pulvérulente.

#### SYNTHESE DES OBSERVATIONS MORPHOLOGIQUES (MACRO- et MICRO-) ET DISCUSSION

Les différentes formes de cristallisation de la calcite reconnues par observations microscopiques, de même que la taille des cristaux, semblent être essentiellement sous la dépendance très étroite des caractéristiques texturales des horizons, et particulièrement de la porosité ; elle conditionne en effet la plus ou moins grande rapidité des alternances de phase de dissolution et de dépôt.

C'est ainsi que la précipitation de calcite en aiguilles ou en bâtonnets se manifeste toujours dans les horizons très calcaires les plus poreux où la forte macroporosité favorise une évaporation très intense ainsi qu'une diffusion rapide dans la microporosité. La vitesse de cristallisation de la calcite à partir de solutions fortement sursaturées en Ca serait donc élevée dans une telle ambiance physico-chimique. La calcite en rhomboèdres est particulièrement reconnue dans les niveaux les plus indurés — croûte compacte, dalle — où la diffusion des solutions de calcite proches de la saturation se fait lentement, les équilibres étant longs à s'établir à travers la microporosité (< 0,2  $\mu$ ). La vitesse de cristallisation de la calcite serait donc très lente dans une telle ambiance physicochimique.

A mesure que décroît la dureté des faciès d'accumulation dans les encroûtements calcaires plus ou moins friables, on assiste à un « affaissement » des structures géométriques, à la dissolution des rhomboèdres qui, en se disjoignant créent une augmentation de la microporosité du milieu ; la diffusion plus rapide des solutions riches en calcite provoque alors la recristallisation de cristaux de formes allongées et de tailles variables (aiguilles...).

D'autres facteurs pourraient intervenir sur la taille et la forme des cristaux de calcite tels que l'influence du système racinaire (POUGET, 1980), la présence d'ions

PHOTO 13. — HNB<sub>1,4</sub> (70-80 cm). Agrandissement d'un micronodule de la photo 12. Assemblage de « baguettes » de calcite constituant une « pelote ».

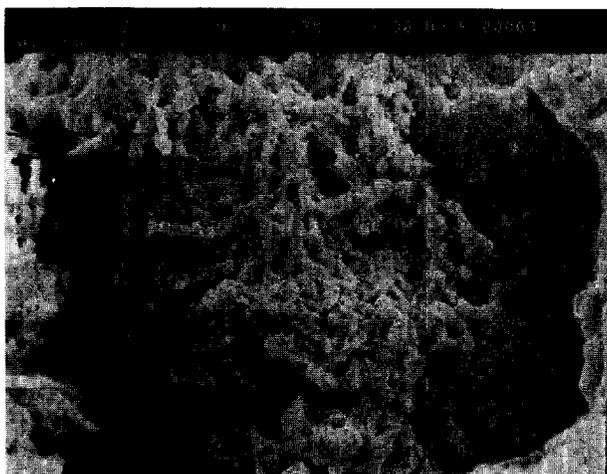
PHOTO 14. — Détail d'une baguette de calcite. Allure de « fibre » constituée de « fibrilles » de calcite torsadées.

PHOTO 15. — Articulation des fibres de calcite à la manière de ponts assurant la cohésion d'ensemble dans le nodule.

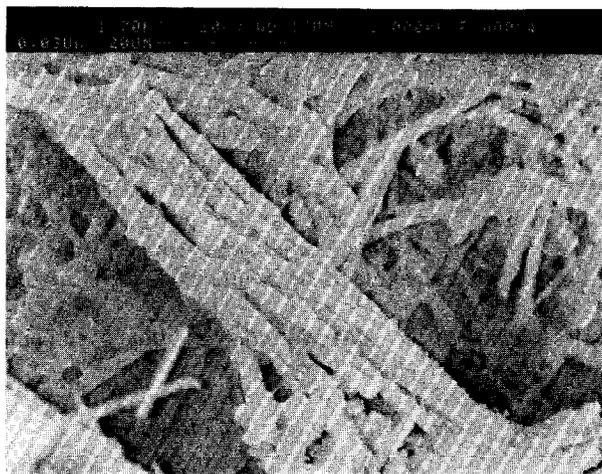
PHOTO 16. — HNB<sub>1,7</sub> (90-100 cm). Quartz calcitisé « flottant » dans une matrice carbonatée pulvérulente de calcite micritique en rhomboèdres émoussés. Noter les golfes de dissolution.

PHOTO 17. — Agrandissement de la photo 16. Epigénie du quartz par la calcite. Naissance de calcite en aiguilles dans la microporosité de dissolution du quartz.

PHOTO 18. — HNB<sub>1,7</sub> (90-100 cm). Calcite micritique en rhomboèdres émoussés et cristallisation de calcite en aiguilles dans la microporosité interstitielle de la matrice pulvérulente de l'horizon *K<sub>e</sub>*.



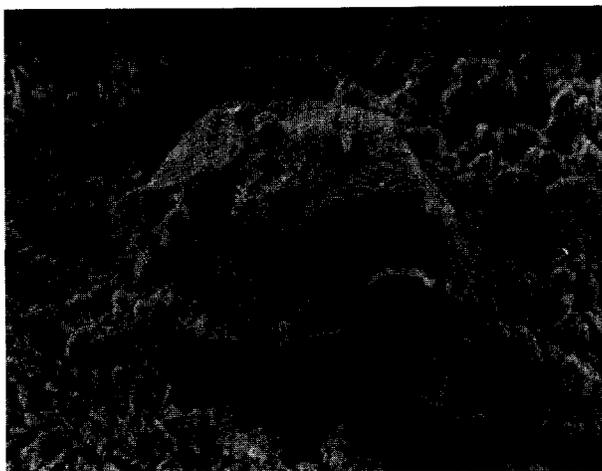
13



14



15



16



17



18

étrangers (Mg) et de composés organiques (DURAND, 1978).

Les observations microscopiques faites dans les différents faciès d'accumulations calcaires particulièrement au niveau du profil LEB<sub>5</sub> rendent compte de transformations géochimiques et microcristallines en cours dans ces derniers. Globalement, trois niveaux de transformations peuvent être dégagés dans ce profil, à savoir :

- 1) les *horizons meubles supérieurs*, rouges, plus ou moins riches en fragments de croûte calcaire (Horizons A et Kh) ;
- 2) les *accumulations calcaires indurées* (dalle avec pellicule rubanée, croûte compacte) ;
- 3) les *encroûtements calcaires, massifs, plus ou moins friables et les encroûtements nodulaires* (Ke).

1 — Dans les *horizons meubles supérieurs* A et Kh, plus ou moins riches en fragments de croûte calcaire, on assiste à la litholyse (RUELLAN, 1970) de ces derniers. La très forte porosité (macroporosité fissurale) et microporosité, la présence d'un système racinaire bien développé, la libération d'une quantité importante d'acides organiques, font que la terre fine de l'horizon A est peu calcaire et que l'on ne trouve généralement pas à ce niveau de figures de recristallisation secondaire de la calcite. L'ambiance physico-chimique étant celle d'un milieu plutôt calcique que calcaire. La tendance globale est à la *lixiviation du carbonate de calcium*.

La dissolution des fragments de croûte, dont la structure feuilletée est plus ou moins conservée, s'observe plus nettement encore au niveau de l'horizon K<sub>h</sub>. Les fragments de croûte, plus poreux, montrent de très nombreux golfes de dissolution remplis d'une matrice pulvérulente où s'insèrent les racines.

La microscopie électronique rend compte, dans cette microporosité, de formes allongées de recristallisation de la calcite (bâtonnets ou aiguilles). Le milieu, plus riche en calcaire, la porosité encore très importante, la diminution du taux en matière organique sont autant de facteurs qui permettent la recristallisation secondaire de la calcite ; elle se fait essentiellement dans une ambiance physico-chimique de milieu très poreux et très calcaire, sous la forme de *pseudomycéliums* intimement associés à la porosité fissurale, interagrats, ou biologique et plus particulièrement dans les galeries racinaires. Le système racinaire joue à ce niveau un rôle fondamental, déjà souligné par POUGET (1980). Il agit en favorisant alternativement, soit la dissolution du CO<sub>3</sub>Ca en augmentant soit la tension en CO<sub>2</sub> (respiration des racines et minéralisation de la matière organique), soit la précipitation des bicarbonates dissous en augmentant la concentration des solutions (évipotranspiration).

Le bilan global restant toutefois à un départ de calcaire essentiellement par dynamique latérale au-dessus des accumulations les plus indurées.

2 — Dans les *accumulations calcaires les plus indurées*, dalles avec pellicules rubanées, croûtes calcaires compactes constituées par une masse très dense de calcite microcristallisée (micrite rhomboédrique), les mécanismes de transformation sont très lents à s'établir dans un milieu où l'ambiance physico-chimique est très calcaire, peu poreux et où les racines sont quasiment absentes ; elles se localisent au réseau de fissures qui traversent les dalles.

3 — Dans les *encroûtements calcaires* sous-jacents ainsi que dans les horizons R<sub>Ca</sub> d'accumulations calcaires, on assiste aux transformations diverses des formes microcristallines de la calcite ; dissolution de la micrite rhomboédrique avec effacement des structures géométriques, recristallisation de la calcite sparitique en aiguilles de tailles variables dans les lumières de la porosité, figures d'épigénie calcaire plus particulièrement visible dans les horizons calcaires de profondeur R<sub>Ca</sub>.

L'observation morphologique détaillée des accumulations calcaires dans les *sables fossilifères riches en Cardium*, communément regroupées sous le terme de « croûtes calcaires », révèle en premier lieu la *grande hétérogénéité* de cette formation superficielle. on constate une différenciation verticale, parfois progressive des faciès qui s'organisent de la base au sommet de la manière suivante : dépôt sableux riche en *Cardium* avec distributions diffuses du carbonate de calcium — encroûtements nodulaires plus ou moins stratifiés, à structure massive — « croûte calcaire » structurée en feuillets passant localement à des dalles avec pellicules rubanées ou non. La différenciation et l'organisation verticale de certains faciès reconnus dans ces matériaux rejoignent les descriptions faites par de nombreux auteurs, entre autres, AUBERT (1947-1960), DURAND (1953-1959), BOULAIN (1957-1961), GILE *et al.* (1956-1966), RUELLAN (1970), FOURNET (1974), POUGET (1980-1981), ELLOY *et al.* (1981), VOGT (1984)... Latéralement et à l'échelle métrique, la disparition rapide de certains faciès d'accumulations calcaires comme KCr<sub>1</sub> et KCr<sub>2</sub> nous permettent de concevoir, dans ce milieu sédimentaire, des conditions locales particulières (microrelief ? hétérogénéité texturale ?) ayant favorisé soit le cheminement préférentiel des eaux chargées de CO<sub>3</sub>Ca et la précipitation ultérieure des carbonates, ou des remaniements par changement isopiezométrique du plan d'écoulement de l'eau d'imbibition, soit le dépôt direct du calcaire en certains sites privilégiés lors de la sédimentation.

Les observations micro- et nanomorphologiques ont

mis en évidence les transformations microcristallines et géochimiques en cours au sein des différents faciès d'accumulations calcaires ; elles sont sous la dépendance des caractéristiques physicochimiques des milieux et sont principalement liées au *comportement hydrodynamique* de ces derniers, fonction de leur texture et de leur porosité, déterminant une ambiance physicochimique plus ou moins saturée en calcaire et des conditions de dissolution-précipitations variables.

Le caractère remarquable de l'accumulation calcaire observée dans les *sables jaunes fossilifères de l'Astien* est la présence de *macronodules (roggons) composés de petits polyèdres*. Plus encore que dans les sables du Tyrrhénien, les différents faciès d'accumulations calcaires montrent une organisation verticale nette ; de la base vers le sommet, on passe successivement de concentrations diffuses et discontinues (RUELLAN, 1970 ; FOURNET, 1974), — pseudomycéliums, taches, amas, revêtements, nodules — à des concentrations calcaires continues — encroûtements nodulaires, feuilletés, « croûte » et/ou dalle, pellicule rubanée. Ces accumulations devenant de plus en plus dures à mesure que l'on va vers le sommet.

Les observations morphologiques faites par ailleurs dans ces matériaux sableux filtrants et à très forte porosité, rendent compte d'une *dynamique actuelle* très active du carbonate de calcium ; elle se manifeste nettement par des formes très variées de concentrations discontinues et/ou diffuses, telles les filaments et autres indices d'entraînements comme les revêtements calcaires le long de galeries racinaires anciennes, qui traduisent la remobilisation du calcaire, le cheminement et le dépôt de ce dernier dans la macro- et la microporosité du milieu.

Cette dynamique est induite ici par les *caractéristiques texturales* du matériau *qui conditionnent le drainage interne* très rapide du milieu et les possibilités de *redistribution du carbonate de calcium*.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les *observations morphologiques* effectuées à l'échelle du terrain ont montré la généralisation des accumulations calcaires dans les différents matériaux géologiques considérés ; il s'agirait plus précisément ici non pas de matériaux géologiques au sens de roche en place, mais de roches-mères issues de remaniements superficiels de la roche géologique ; la roche-mère étant déjà là un matériau altéré. *L'élément calcaire envahit tout le paysage géomorphopédologique régional*.

Toutefois, si d'une façon générale les principaux faciès d'accumulations, de même que leurs organisations — tant verticale que latérale — sont reconnus dans tous les matériaux, deux types d'accumulations peuvent être

globalement différenciés suivant la prédominance de l'un des deux facteurs majeurs ayant contribué à la concentration du calcaire au sein du matériau d'accueil, à savoir *la sédimentation et la pédogénèse*.

C'est ainsi que dans les formations marines sableuses du Tyrrhénien aux sols rouges (méditerranéens), la sédimentation dans un milieu tranquille et peu profond et/ou l'apport par transport superficiel a permis la concentration du calcaire au sein du dépôt. Mais cette sédimentation a connu elle-même de fréquents remaniements et la superposition des faciès d'accumulations dont l'organisation verticale se répète en LEB<sub>5</sub> témoigne de plusieurs phases d'apports donc de l'existence de circulations et de dépôts consécutifs en des sites préférentiels (pièges) liés au microrelief lors de la sédimentogénèse.

Les observations micromorphologiques ont montré qu'à cette phase sédimentaire se surimpose dès la constitution du dépôt une évolution de type pédogénétique englobant l'ensemble des processus qui se développent à l'intérieur même du « profil calcaire au départ non différencié » et qui sont régis par les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du milieu. Interviennent ici en premier lieu les caractéristiques hydrodynamiques du matériau d'accueil — percolation, évapotranspiration, dessiccation — fonctions essentiellement de sa nature texturale et de sa position topographique (présence de nappe ?) ; en second lieu se manifeste l'activité des micro-organismes et de la végétation (plantes, algues...) qui jouent un rôle majeur dans les actions diagénétiques en milieu vadose. Chaque phase de dépôt sert de départ à une évolution pédogénétique où le matériau subit, dès que les conditions le permettent en fonction des caractéristiques précédemment évoquées, tout un ensemble de transformations — y compris l'épigénie — qui peuvent aboutir à la constitution d'une « roche calcaire » monominérale et par diagénèse à la lithification de la dalle.

Les cycles climatiques qui se sont succédés au cours du Quaternaire avec alternance de phase : pluvial/catapluvial/interpluvial/anapluvial, ont conditionné les concentrations calcaires au sein des dépôts. Durant les périodes catapluviales (érosion), de même que lors des transgressions marines, ce sont les processus sédimentaires qui prédominent ; l'évolution pédogénétique se faisant par contre prépondérante durant les périodes de stabilité.

Dans l'Astien, moins soumis aux remaniements périodiques, par la texture sableuse très filtrante du matériau et la position topographique dominante des grands plateaux, c'est la pédogénèse qui apparaît dominante. Elle se traduit par une différenciation plus nette des faciès d'accumulations calcaires et par une mobilisation actuelle très active du carbonate de calcium.

Cette *dynamique actuelle* du calcaire est encore appréhendée, mais à un degré moindre (texture), dans les marnes du Vindobonien.

L'importance des circulations latérales et/ou obliques de solutions riches en carbonate de calcium est révélé par les dépôts conglomératiques à encroûtement calcaire qui rendent compte d'une *dynamique longitudinale* du calcaire en provenance de l'amont du paysage et *transversale* à partir des versants.

Les accumulations calcaires en surface des formations dunaires sableuses consolidées sont indicatrices de la *rapidité* avec laquelle les « croûtes calcaires » peuvent se développer au sein de certains matériaux ; seule la constitution très rapide d'une « carapace calcaire » protectrice, immédiatement après la mise en place des

dunes (rôle des embruns) a permis le maintien de ces dernières et l'état de fraîcheur actuel du cordon malgré les phases de creusement postérieures à leur formation.

Enfin dans tous les cas considérés, les observations morphologiques montrent la *litholyse* actuelle des horizons supérieurs les plus concentrés en calcaire (« croûtes », dalles avec pellicules rubanées...) sous l'action combinée de la végétation et du climat actuel ; l'Homme, par son action directe (décroûtage) ou indirecte (modification de l'éco-système) accélère le processus.

*Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23 mars 1988.*

#### BIBLIOGRAPHIE

- ARNOULD (M.), 1950. — Carte géologique de la Tunisie. Feuille n° 22 au 1/50 000 Menzel Bou Zelfa et notice explicative. Rép. Tunisienne, Minist. Ec. Nat. Direct. Mines et Géol. Serv. Géol.
- AUBERT (G.), 1947. — Les sols à croûtes calcaires. Conf. Pédol. Méd., Montpellier - Alger : 330-332.
- AUBERT (G.), 1960. — Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Actes coll. Unesco de Paris sur les problèmes de la zone aride : 127-150.
- BONVALLOT (J.), DELHOUME (J.P.), 1978. — Etude de différentes accumulations carbonatées d'une toposéquence du Centre tunisien (djebel Semmama). 103<sup>e</sup> Congr. Nat. Soc. Sav., Nancy, 1978, Sci. Fasc. IV : 281-292.
- BOULAIN (J.), 1961. — Etude des sols des plaines du Chélif. Thèse Doct. Etat, Alger, 582 p.
- BOULAIN (J.), 1961. — Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. C.R. Acad. Sc. 253 : 2568-2570.
- BUREAU (P.), 1959. — Etude pédologique de la région de Kélibia. Rép. Tun. Secrét. Etat Agric. H.A.R. Sect. Spéc. Et. Pédol. Hydrol. SOGETHA, 35 p., n° 151, cartes 1/25 000.
- CHAUVEL (A.), 1961. — Etude pédologique du périmètre de l'oued Chiba. Rép. Tunisienne. Secrét. Etat Agric. H.A.R. Sect. Spéc. Et. Pédol. Hydrol. SOGETHA, 51 p., n° 187, carte 1/50 000.
- COLLEUIL (B.), 1976. — Etude stratigraphique et néotectonique des formations néogènes et quaternaires de la région de Nabeul-Hammamet (Cap Bon - Tunisie). D.E.S., Univ. Nice.
- DURAND (J.H.), 1953. — Etude hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. Pub. Gouv. Gén. Algérie. S.E.S. Alger, 209 p.
- DURAND (J.H.), 1959. — Les sols rouges et les croûtes en Algérie. S.E.S., Alger, 188 p.
- ELLOY (R.), THOMAS (G.), 1981. — Dynamique de la genèse des croûtes calcaires (calcrètes) développées sur séries rouges pléistocènes en Algérie nord-occidentale. Contexte géomorphologique et climatique. Pétrographie et géochimie. *Bull. Centr. Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine*, 5, 1 : 53-112, 6 fig., 4 tabl., 10 p., 1981, ISSN, 039-2687, CODEN, BCREDP.
- ESWARAN (H.) et SHOBA (S.A.), 1981. — Scanning Electron Microscopy in Soil Research. Soil Micromorphology, Vol. 2 : Technics and applications. Bullock P., and Murphy C.P. (Eds). Soil Survey of Eng. and Wales, Rothamsted. : 19-51.
- FOURNET (A.), 1974. — Etude pédologique de la dorsale tunisienne (transversale Kebir - Bargou - Serdj - Ousseltia). *Revue Sols de Tunisie* n° 6, D.R.E.S., Div. Sols, Minist. Agric. Tunis.
- FOURNET (A.), 1981-82. — Relations stratigraphiques entre les séries sédimentaires quaternaires continentales et marines dans la coupe du canal d'El Haouaria (Cap Bon - Tunisie Septentrionale). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, Vol. XII, n° 1 : 29-39.
- GILE (L.H.), PETERSON (F.F.), GROSMAN (R.B.), 1965. — The K horizon. A master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Science* (Baltimore), 99, 2 : 74-82.
- GILE (L.H.), PETERSON (F.F.), GROSMAN (R.R.), 1966. — Morphological and genetic sequences of carbonate

- accumulation in desert soils. *Soil Science* (Baltimore), 101, 5 : 347-360.
- GROSSE (M.), 1969. — Recherches géomorphologiques dans la péninsule du Cap-Bon (Tunisie). Publ. Univ. Tunis, 3<sup>e</sup> sér. *Mém. Sci. Et. Sc. Hum.*, Vol. X, 358 p.
- PASKOFF (R.), SANLAVILLE (P.), 1983. — Les côtes de la Tunisie. Variations du niveau marin depuis le Tyrrhénien. Collect. Maison de l'Orient méditerranéen. N° 14, Sér. Géogr. et Préhist., 2, 192 p.
- POUGET (M.), 1980. — Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes : quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVIII, n° 3-4, 1980-1981 : 235-246.
- POUGET (M.), 1980. — Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. *Trav. et Doc. de l'ORSTOM*, n° 116, 1980, 555 p.
- RUELLAN (A.), 1970. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de Basse Moulouya (Maroc Oriental). Contribution à la connaissance des sols méditerranéens. *Mém. ORSTOM*, n° 54, 302 p.
- RUELLAN (A.), 1980. — Caractérisation des sols calcaires à régime hydrique, xérique ou aridique. Third Internat. Soil Classif. Workshop. Damascus-Syria, 1980, 18 p.
- VOGT (TH.), 1984. — Croûtes calcaires : types et genèse. Exemples d'Afrique du Nord et de France méditerranéenne. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg. Inst. Géogr. Lab. Géogr. Phys. Mil. Temp., 228 p.