

Encroûtements calcaires dans les altérations de matériaux marno-gréseux aptiens de la dorsale tunisienne (jebel Bargou) Mise en évidence des phénomènes d'épigénie

Philippe BLANCANEUX

(1) Pédologue ORSTOM, Mission de Tunisie, 7 rue Jeimour, 1004 Tunis el Menzah 1.

RÉSUMÉ

Dans la dorsale tunisienne, l'accumulation de calcaire au sein de couvertures pédologiques variées est un phénomène largement représenté dans les zones de piedmonts, de glacis ou de glacis/terrasses ceinturant les grands massifs montagneux.

Grâce à l'abondance des sources de carbonates dans le milieu, cette concentration en calcaire peut s'effectuer dans certains cas par épigénie. Ce phénomène a été plus particulièrement observé dans les altérations de matériaux marno-gréseux aptien, favorisé par la structure lithologique de ces derniers.

Il se caractérise par l'« effacement » de certains minéraux présents qui sont peu à peu remplacés par la calcite.

Les observations morphologiques de terrain, puis micromorphologiques sur échantillons non remaniés et sur agrégats, couplées à la microanalyse faite simultanément en microscopie électronique et aux analyses roentgenographiques, rendent compte de la calcitisation progressive des matériaux au fur et à mesure de cette évolution. On assiste globalement à une modification des structures en relation avec les variations minéralogiques au cours de l'épigénie, principalement des argiles et du quartz par la calcite, tandis que la matrice carbonatée subit elle-même des transformations déterminées par les conditions de dissolution/précipitation d'un milieu très poreux à ambiance physico-chimique saturée en calcium et régi par l'alternance des périodes sèches et humides.

L'argilification et la calcitisation s'accompagnent d'une smectitisation des matériaux.

MOTS-CLÉS : Accumulation calcaire — Carbonates — Epigénie — Altérations — Calcite — Microanalyse — Ambiance physico-chimique.

ABSTRACT

**LIMESTONE ENCRUSTATIONS IN APTIAN MARL SANDSTONE WEATHERINGS OF THE TUNISIAN RIDGE (JEBEL BARGOU).
IDENTIFICATION OF EPIGENY PHENOMENA**

In the "Tunisian ridge", calcareous accumulation within various soils mantles is a phenomenon widely represented in the piedmonts, piedmonts slopes (glacis) or glacis/terraces surrounding the main mountains.

Due to the abundance of environmental carbonates springs, calcareous concentration may occur in some cases by epigeny. This phenomenon was particularly observed in the "aptian" calcareous sandstones alterations, emphasized by the lithological structure of the latter.

It is characterized by the "fading off" of some existing minerals which are being gradually replaced by calcite.

Morphological observations in the field, then micromorphological observations of undisturbed samples and of aggregates, coupled with the simultaneous microanalysis by Scanning Electron Microscopy with micro-analyser and Roentgenographical (R.X.) analysis, show the gradually and progressive calcification of the materials during this evolution.

One the whole one faces a modification of the structures related to the mineralogical variations during epigeny, mainly of the clays and quartz by calcite, while the carbonated matrix itself undergoes some transformations determined by the dissolution/precipitation conditions in a very porous material where the "physico-chemical ambience" is saturated by calcium and governed by the alternation of dry and wet periods.

Clay-forming and calcification (calcite-forming) of the materials are accompanied by a smectite-forming.

KEY WORDS : Calcareous accumulation — Carbonates — Epigeny — Alterations — Microanalysis — Calcite — Physico-chemical ambience.

RESUMEN

INCRUSTACIONES CALCÁREAS EN ALTERITAS DE SEDIMENTOS ARENISCO-MARGOSOS APTIANOS (JEBEL BARGOU). IDENTIFICACIÓN DE FENÓMENOS DE EPIGENIA

La acumulación calcárea en varios suelos de la « dorsal tunecina » es un fenómeno ampliamente representado en las áreas de piedemontes, glacis o glacis/terrazas que rodean los macizos montañosos.

Gracia a abundantes fuentes de carbonatos en el medio, esta concentración en calcáreo puede efectuarse, en algunos casos, por epigenia. Este fenómeno fué particularmente reconocido en las alteraciones de materiales arenisco-margosos del Aptiano, cuya estructura litológica lo favorece.

Se caracteriza por el reemplazamiento progresivo de ciertos minerales por la calcita.

Las observaciones morfológicas de campo, luego micro-morfológicas de « muestras no retrabajadas » y de agregados, hechas simultáneamente con el microanálisis, la microscopía electrónica y los R.X., resaltan la calcitización progresiva de los materiales a medida de esta evolución. De manera global, se nota una modificación de las estructuras, en relación con las variaciones mineralógicas durante la epigenia, sobre todo de las arcillas y del cuarzo por la calcita. La matriz carbonatada padece unas transformaciones determinadas por las condiciones de disolución/precipitación en un medio muy poroso con « ambiente físico/químico » saturado con calcio y controlado por la alternación de periodos secos y húmedos.

Se acompañan la formación de arcilla y la calcitización de los materiales de una liberación de smectita.

PALABRAS CLAVES : Acumulación calcárea — Carbonatos — Epigenia — Alteraciones — Calcita — Microanálisis — Ambiente físico/químico.

INTRODUCTION

Dans la dorsale tunisienne (fig. 1), les accumulations calcaires sont remarquablement bien représentées, plus particulièrement dans les zones de piedmonts, glacis et glacis/terasses qui ceinturent les grands jebels, entre autres ceux du Bargou et du Serdj. Elles se développent sur des matériaux hétérogènes dérivant de formations géologiques d'âges et de nature divers (FOURNET, 1974 ; TURKI, 1975). L'observation, à différents niveaux, de ces formations superficielles encroûtées (1) nous a permis d'approcher l'organisation et la répartition de ces dernières dans les paysages naturels ; puis de préciser certains faciès de ces accumulations carbonatées dans différents types de sols. Les faciès variés ainsi reconnus apparaissent étroitement associés

aux caractéristiques physiques (texture, porosité, perméabilité...) des matériaux « d'accueil », donc essentiellement conditionnés par le comportement hydrodynamique de ces derniers ; et cela, en relation directe avec les particularités locales du modèle, et la position topographique des couvertures pédologiques dans le contexte géomorphologique et sédimentologique — sédimentogénèse continentale — local (BLANCANEUX *et al.*, 1988). Une chronologie quaternaire, relative, de ces différentes formations encroûtées, déjà tentée par FOURNET, 1974, a ainsi été davantage précisée en fonction des divers faciès d'accumulations reconnus et des caractéristiques distinctes que présentent ces dernières au sein des matériaux d'accueil (dépôts, alluvions, colluvions...), et de la stratigraphie locale de ces formations (BLANCANEUX *et al.*, 1987-1988 ; TOUMI, 1988 ; OUEFFELLI, 1988 ; HOUMANE *et al.*, 1988).

(1) Etudes effectuées dans le cadre du programme de recherches sur les accumulations calcaires, gypseuses ou salines dans les sols de Tunisie. Programme mené conjointement par l'ORSTOM et le laboratoire de Pédologie de la faculté des Sciences de Tunis.

Bien que la *genèse et la mise en place* de la plupart de ces accumulations calcaires se soient principalement effectuées au cours du Quaternaire — depuis le Villafranchien ancien — les *redistributions, voire l'accumulation* des carbonates peuvent se produire actuellement. Cette concentration peut s'effectuer par *épigénie* de certains minéraux par la calcite. C'est ce mécanisme déjà reconnu par de nombreux auteurs, entre autres NAHON *et al.*, 1975 ; MILLOT *et al.*, 1977 ; RUELLAN *et al.*, 1977 ; BECH *et al.*, 1980, et en Tunisie-même par DELHOUME, 1980 ; TRUC *et al.*, 1985 ; ABDELJAOUAD *et al.*, 1987, mais observé pour la première fois dans cette partie de la dorsale tunisienne, que nous nous proposons d'étudier ici.

LE MATÉRIEL D'ÉTUDE

Le contexte géomorpho-pédologique (fig. 1 et 2)

Le profil MT3 étudié est localisé dans l'Atlas tunisien nord-oriental. Il se situe dans la dorsale tunisienne, sur le versant N.E. du jebel Bargou, à 3,7 km du village d'Aïn Bou Sadia.

Au lieu de l'observation, il s'agit de *marnes grises*, feuilletées alternant avec des *grès roux* ; localement ces marnes sont plus sableuses, grises, avec des intercalations de *lits gréseux*. Les bancs marneux et gréseux sont parfois très redressés, plissés et passent latéralement, sur une dizaine de mètres, à des bancs subhorizontaux. Ces matériaux feraient partie de la formation Dridja (Aptien) selon TURKI (1987-1988).

Le profil MT3 à 520 m.s.n.m, est par ailleurs situé dans la zone de *piedmont* qui s'étend au pied des barres calcaires apto-albiennes (formation Serdj) qui coiffent les sommets du jebel Bargou et du Serdj.

Les jebels Bargou et Serdj forment une vaste structure anticlinale — complexe Serdj-Bargou — presque coffrée, dont les différentes unités stratigraphiques s'étagent depuis l'Aptien (formation Dridja) jusqu'au miopliocène continental (formation Segui), TURKI (1975 ; 1987-1988).

La quasi-totalité de ces formations géologiques contiennent beaucoup de carbonates soit sous forme d'intercalations, soit parce que le matériau est lui-même totalement calcaire.

Ces carbonates sont dissous et transportés par les eaux du sol et nous les retrouvons redistribués dans différents matériaux d'accueil, en relation avec le paysage géomorphologique.

Le contexte bioclimatique et la végétation

Au sein du bioclimat méditerranéen le profil MT3 se trouve dans une zone de transition entre l'étage subhumide et l'étage semi-aride, sous-étage supérieur, variante

à hiver frais, sous-variante d'altitude. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 560 mm ; il est à noter que ces précipitations sont beaucoup plus abondantes sur les sommets voisins du jebel Bargou (1 100 m) avec un gradient décroissant rapidement vers

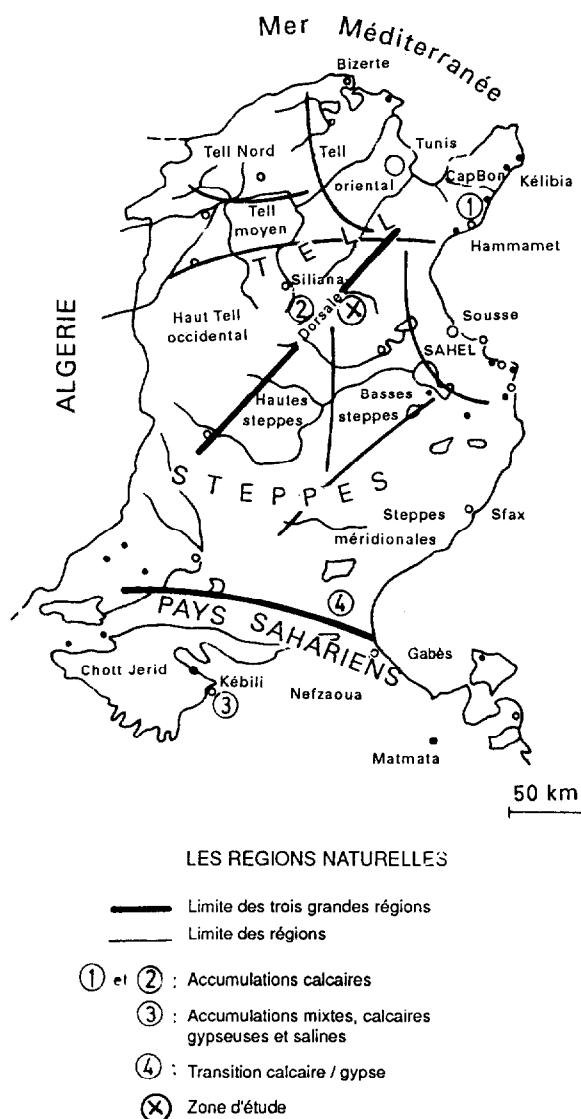


FIG. 1. — Situation des différents sites des accumulations calcaires, gypseuses ou salines de Tunisie.

Localization of divers sites of calcareous, gypseous or saline accumulation in Tunisia.

— Boundaries of the three principal regions

— Boundaries of regions

1-2. Calcareous accumulation. 3. Joint calcareous, gypseous and saline accumulations. 4. Calcium/Gypsum transition. Survey zone.

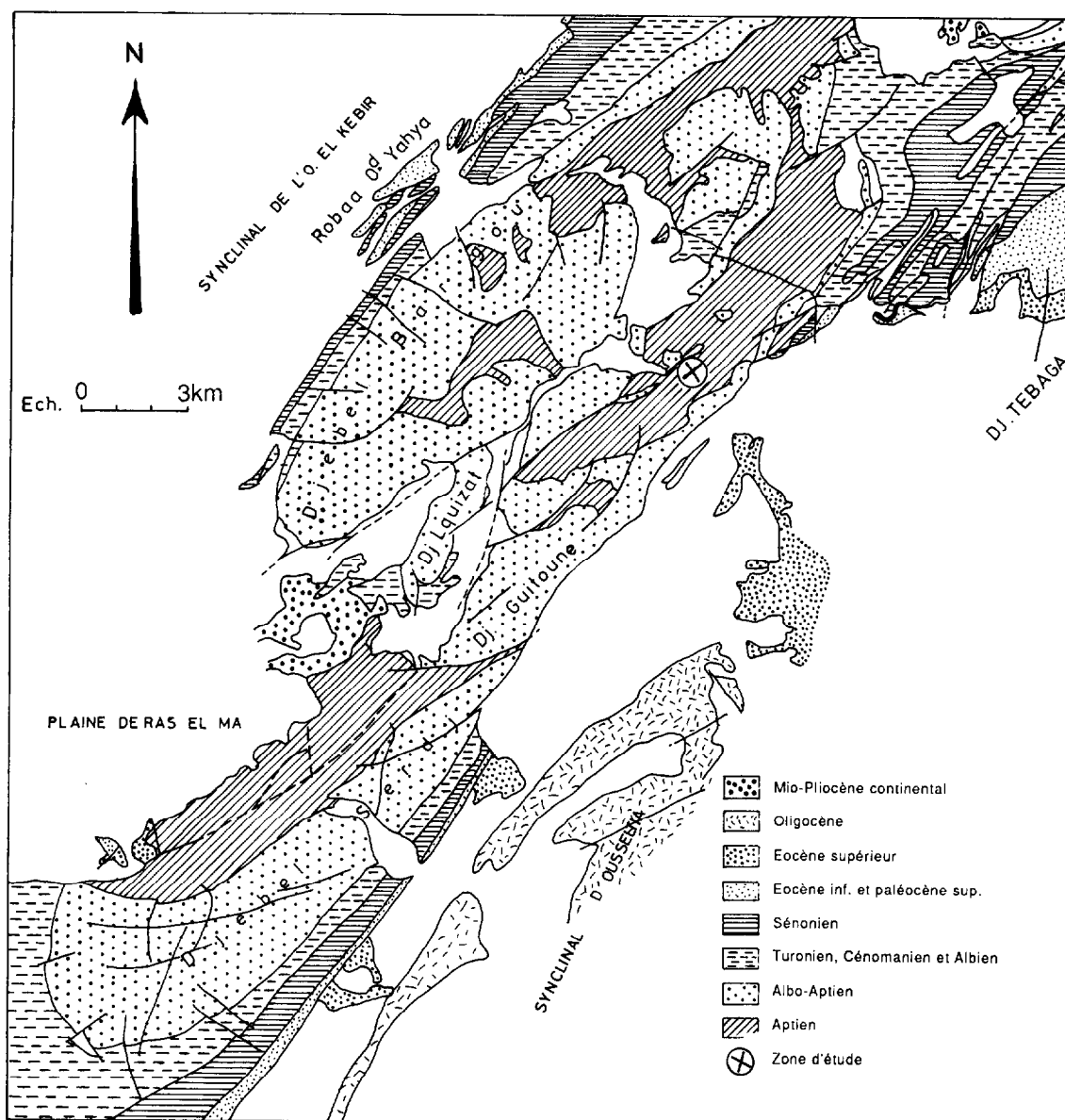


FIG. 2. — Carte géologique du massif Serdj-Bargou, d'après TURKI (M.M.), 1975.
Geological map of Serdj-Bargou massif. After TURKI (M.M.), 1975.

l'aval et vers l'est (ZEBIDI, 1963). L'abondance relative des précipitations en zone amont associées aux chutes épisodiques de neige détermine dans la zone étudiée un *domaine d'altération* et d'érosion mécanique intense.

Au lieu du profil MT3, parmi les espèces végétales les plus régulièrement rencontrées, nous signalons : *Pinus halepensis* ; *Edisarum capitatum* ; *Erica multiflora* ; *Calycotum vilosa* ; *Rosmarinus officinalis* ; *Genista sp.*

LES MÉTHODES D'ANALYSES

L'organisation macromorphologique du profil MT3 (fig. 3)

Le profil MT3 étudié est décrit ici dans sa totalité, de haut en bas, en utilisant pour les individualisations des carbonates la terminologie proposée par RUELLAN (1971). Toutefois, c'est essentiellement sur les *matériaux d'altération marno-gréseux*, dont les *structures*

TABLEAU I
Les différentes unités chrono- et litho-stratigraphiques du jebel Bargou
(d'après TURKI (M.M.), 1975)
Divers chrono- and litho- stratigraphic units of jebel Bargou
(After TURKI (M.M.), 1975)

Unités chrono-stratigraphiques		Unités litho-stratigraphiques
Systèmes	Etages	
Mio-Pliocène continental		SEGUI : Grès grossiers ; marnes sableuses ; sables jaunes, rouges et blancs à conglomérats
Oligocène		FORTUNA : Grès ferrugineux beige-brunâtre formant barres alternant avec marnes sableuses brunâtres et grès jaune ou vert
Eocène supérieur et moyen	Priabonien	SOUAR : marnes et argiles bleu-noir ou olive, feuilletées ou friables. <i>Intercalations de calcaires</i> ; grès et bancs de lumachelles.
	Lutétien	METLAOUI : <i>Calcaires gris</i> à gris-noir à glauconie et phosphate.
Eocène inférieur Paléocène sup.	Yprésien Thanétien	EL HARIA : Marnes et argiles gris à gris sombre ; miches gypso-terreuses ; rares <i>intercalations calcaires</i> .
Crétacé supérieur	Sénonien : Maestricht. Campanien Santonien Coniacien	ABIOD : <i>Calcaires gris blanc</i> , crayeux à patine blanchâtre formant des barres. ALEG : Marnes et argiles avec <i>intercalations calcaires</i> .
Crétacé inférieur	Turonien Cénomani Albien	FAHDENE : Marnes parfois schisteuses et argiles ; <i>intercalations calcaires</i> et marneuses.
	Aptien - Albien basal	SERDJ : <i>Calcaires massifs</i> , durs, gris, siliceux, localement dolomitiques ; faciès subréclifal.
	Aptien	DRIDJA : Séquence marno-gréseuse à <i>intercalations de calcaires</i> marneux et argileux.

géologiques conservées apparaissent à partir de 50 cm de profondeur, que nos observations analytiques ont porté.

ORGANISATIONS VERTICALE ET LATÉRALE DES HORIZONS PÉDOLOGIQUES DU PROFIL MT3

3-0 cm : Litière discontinue de débris végétaux mal décomposés ; aiguilles de pin.

0-14 cm : Brun (1) à brun foncé (10YR4/3) ; sablo-limoneux ; grumeleux ; humifère ; matière organique directement décelable ; racines très fines, fines et moyennes, sans direction préférentielle, entre les agrégats ; graviers et *concrétions calcaires* et

grésocalcaires, de formes irrégulières, hétérométriques et blanchâtres (10YR8/2), émoussés, plus ou moins altérés. Plus ou moins friables, dans la masse de l'horizon. Fréquents éléments nodulaires calcaires, hétérométriques, présence d'amas polyédriques et de calcaire diffus entre les racines ; effervescence modérée à HCL ; matériau meuble poreux, sec, peu résistant.

Transition graduelle, ondulée

14-27 cm : Brun-jaunâtre (10YR5/4) ; sablo-limoneux, grumeleux à polyédrique subanguleux ; matière organique directement décelable ; rares éléments grossiers ; nodules calcaires et concrétions, hétérométriques, brun très pâle (10YR8/3) dans la masse de l'horizon, sans orientation particulière ; effervescence à HCL ; racines fines et moyennes plus ou moins horizontales ; quelques petites concrétions gréseuses, ferruginisées, millimétriques. Matériau meuble, poreux, frais, peu résistant.

Transition diffuse, ondulée

27-50 cm : Brun jaunâtre clair (10YR6/4) ; sablo-limoneux, grumeleux à polyédrique subanguleux ; forte effervescence à HCL ; quelques traces d'infiltration de matière organique le long des galeries racinaires ; racines moins fréquentes, moyennes et grosses, à tendance horizontales ; graviers calcaires et grésocalcaires, de formes irrégulières, hétérométriques, dans la masse de l'horizon ; amas, nodules et taches calcaires ; encroûtement nodulaire calcaire ; peu massif ; peu cohérent.

Transition graduelle, ondulée

> 50 cm : A ce niveau, la roche mère apparaît et présente (fig. 4) *trois faciès litho-pédologiques morphologiquement différenciables* sur le terrain. Elle est en effet constituée de *bancs gréseux*, plus ou moins redressés, alternant avec des lits de *marnes feuilletées*, plus ou moins altérées et au sein desquelles se différencient et s'individualisent des *passées blanchâtres de carbonate de calcium, poudreuses*.

Nous décrivons ici successivement :

a) *Les bancs gréseux, plus ou moins calcaires* (photos 1 et 2)

Ces grès, de couleur roux à brun jaunâtre (10YR6/6) présentent une patine brune à rouille (10YR3/3) ; ils sont localement très redressés avec un pendage atteignant parfois 80° ; ils se présentent sous la forme de *filons* plus ou moins cassés en blocs hétérométriques dont la taille moyenne atteint 6 × 5 cm ; ces blocs sont disjoints et séparés par des fissures bourrées d'argile brun jaunâtre clair (10YR6/4) ou remplies de dépôts

(1) Les couleurs ont été déterminées à l'état d'humidité du sol ; frais le jour de l'observation.

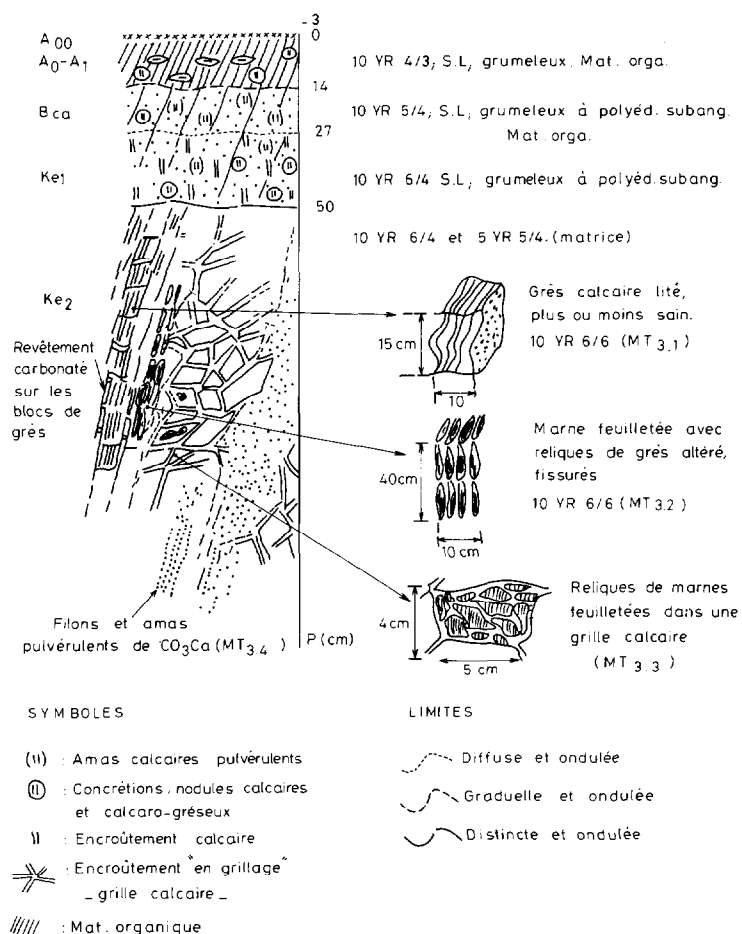


FIG. 3. — Profil MT₃ — Organisation verticale des horizons pédologiques, variation latérale des faciès d'accumulations calcaires.
Vertical organization of soil horizons — Lateral changes of calcareous accumulations facies.

SYMBOLS

Powdery calcareous accumulation
 Chalkstones, calcareous or gritty nodules
 Calcareous encrusting
 Gratelike encrusting
 Organic matter.

BOUNDARIES

Blurred and wavy
 Gradual and wavy
 Distinct and wavy

poudreux blanchâtre (10YR8/3) de carbonate de calcium. Les blocs gréseux disloqués sont plus ou moins durs suivant leur degré d'altération. Les blocs sains se débitent au marteau, offrant une striation parallèle au pendage, constituée de *lits fins clairs* ou de couleur plus sombre ocre brune, avec des taches rougeâtres d'oxydation. Sur les faces des cassures fraîches, on observe à l'œil nu de très nombreux petits grains brillants qui, à la loupe, se révèlent être des *quartz*. Sur les faces plus ou moins altérées, on observe des *pellicules* de couleur rouille et des placages argileux ainsi que des « *écailles* » de carbonate de calcium. On remarque par ailleurs que les dépôts de CO₃Ca se font préféren-

tiellement à la base des blocs gréseux ; en effet, en soulevant ou en dégageant ces blocs à partir des filons, on observe la présence d'*écailles calcaires sur la face inférieure* de ces derniers. En contact brutal, planaire, millimétrique, on passe du matériau gréseux et grésocalcaire à un matériau marneux, feuilleté plus ou moins calcarifié.

b) Le matériau marneux, feuilleté, plus ou moins calcarifié (photo 3)

Il se débite en plaquettes ; il est fissuré dans le sens des striations du matériau gréseux dont il semble constituer un prolongement naturel. Quelques éléments de

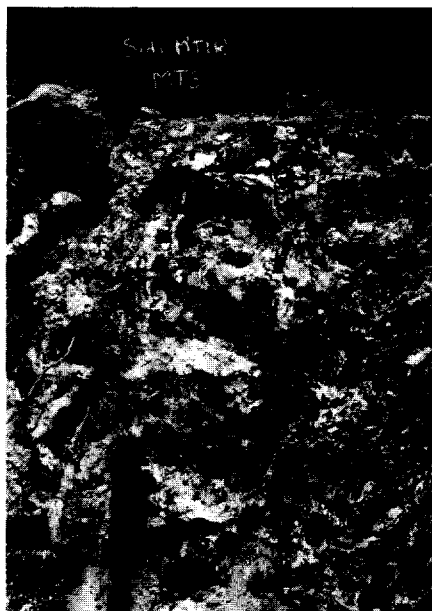


PHOTO 1. — Organisation latérale du profil MT3.

Lateral organization of profile MT3.

PHOTO 2. — Les bancs gréseux plus ou moins calcaires.

Gritty layer more or less calcareous.

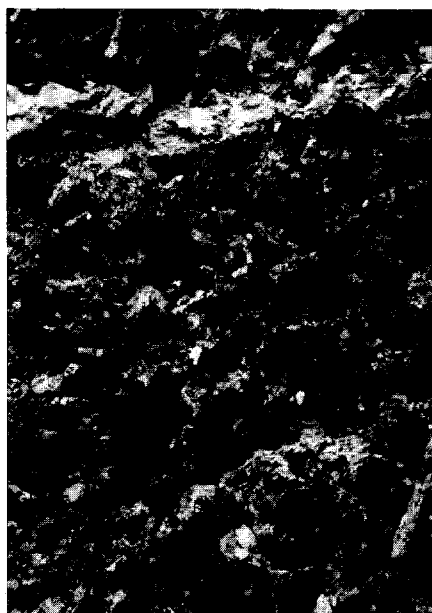


PHOTO 3. — Le matériau marneux, feuilleté plus ou moins calcarifié.

Foliated marly material more or less calcified.

PHOTO 4. — Les filons et les plages de carbonate de calcium pulvérulent.

Veins and areas of powdery calcium carbonate.

grès, plus ou moins altérés mais à structure géologique conservée « *flottent* » dans ce matériau marneux dont la structure est polyédrique anguleuse, se débitant en plaquettes extrêmement fragiles. Au contact des bancs gréseux, les *marnes feuilletées* ont une couleur brun jaunâtre (10YR6/6) qui passe à un brun jaunâtre clair (10YR6/4) dans les passées plus argileuses, puis à une couleur olive (5YR5/4).

Ce matériau marneux, argileux, feuilleté est rempli d'un réseau de fissures millimétriques à centimétriques, obliques, voire perpendiculaires au sens général du feuilletage ; ces fissures bourrées de carbonate de calcium poudreux, blanchâtre, s'organisent en réseau orthogonal et donnent l'allure d'une *grille calcaire* au matériau (photo 3). L'ensemble est très fragile, très peu cohérent.

On note également la présence de grosses racines qui

s'immiscent en profondeur, principalement dans les lits tendres carbonatés situés entre les bancs marno-gréseux relativement plus durs ; c'est principalement le long de ces galeries racinaires que l'on observe une accumulation relative de CO_3Ca . De grosses racines mortes persistent dans ce matériau, auréolées de dépôts poudreux blanchâtres prenant localement une couleur brune. On passe latéralement et très rapidement soit à de nouveaux bancs de grès identiques à ceux qui ont été décrits antérieurement, soit à des filons subverticaux de carbonate de calcium pulvérulent et très blanc.

c) *Les filons et les plages de carbonate de calcium pulvérulent* (photo 4)

La transition entre la *marne feuilletée* et les *filons poudreux* de carbonate de calcium est d'ordre centimétrique. On passe par un matériau de plus en plus carbonaté — *c'est la marne elle-même qui se charge de calcaire* — jusqu'à des filons ou des plages blanchâtres de carbonate de calcium. Par endroits, certaines de ces plages sont barriolées de taches jaune brunâtre (10YR6/8) d'oxydation liées au cheminement préférentiel des racines dans ce matériau qui, à l'état sec, a une consistance de farine.

Suivant l'état d'avancement des différentes phases d'altération des matériaux, des *reliques de plaquettes marneuses structurées* en feuillets, « flottent » dans la matrice carbonatée blanchâtre et pulvérulente. La texture du matériau est limoneuse à limono-sableuse à *sable très fin*. La structure est particulière en assemblage peu massif ; le matériau très fragile, est bouillant à l'état sec.

Les données des analyses microscopiques et ultra-microscopiques (observations aux microscopes optique et polarisant, au microscope électronique à balayage — M.E.B. — et micro-analyse semi-quantitatives à la microsonde) (1)

Les échantillons MT3.1, MT3.2, MT3.3 et MT3.4 correspondant aux différents types de matériaux différenciés lors des observations de terrain par leurs teneurs respectivement croissantes en CO_3Ca (fig. 3) ont été analysés à différentes échelles. Ces analyses ont porté soit sur des *lames minces d'échantillons non remaniés* prélevés *in situ* pour les études micromorphologiques et microscopiques, à la binoculaire, au microscope optique puis polarisant et enfin au M.E.B., soit sur des agrégats ; ces derniers ont été également observés à la loupe binoculaire avant leur métallisation au platine ; les observations au M.E.B. de ces agrégats étant alors couplées aux analyses effectuées à l'aide du micro-analyseur (1).

ECHANTILLONS MT3.1

Ils correspondent à de petits fragments centimétriques de grès calcaires plus ou moins sains.

En microscopie électronique, la photo 5 montre au faible grossissement, une alternance de *lits sombres et de lits clairs* plus ou moins parallèles. L'analyse globale (fig. 4, graph. 1) de l'échantillon révèle la prédominance des éléments Si et Al sur tous les autres constituants présents K, Ca, Fe. La micro-analyse des *lits clairs* (photos 5, 6 et graph. 2) montre que ces derniers sont essentiellement constitués de Si avec des traces de Fe et d'Al. Dans les *lits sombres*, on note par contre (graph. 3) la prédominance du Mn et du Fe sur les autres éléments présents Si, Al et Ca. D'autres analyses effectuées en différents points lors du balayage des lits sombres montrent des variations dans les teneurs des différents éléments. Dans une *zone de transition* entre les lits sombres et les lits clairs (graph. 4), on observe le pic très net de Si avec le cortège Al, K, Ca, Fe. Par comparaison avec le graph. 2 on retiendra donc l'augmentation des teneurs en ces derniers éléments au fur et à mesure de *l'argilification du matériau*. En effet, les observations faites à faible grossissement dans les *lits clairs* révèlent la constitution et l'organisation des différents éléments présents qui apparaissent sous l'aspect de filaments ou de *fibres filamenteuses* et de baguettes plus ou moins contournées (photo 6). Le graph. 5 correspond à la microanalyse d'une de ces fibres qui est essentiellement constituée de Si avec quelques impuretés (Al, Fe, Ca). *Les lits sombres* du même échantillon se montrent par contre constitués de *feuillets d'argile* avec un début de calcitisation (photo 7 et graph. 3).

En résumé, les *lits clairs* de l'échantillon de grès plus ou moins sain sont essentiellement constitués de *silice* plus ou moins amorphe, d'allure filamenteuse. *Les lits sombres* apparaissent constitués de *feuillets argileux* avec plus ou moins forte prédominance du Fe et du Mn sur la silice, l'aluminium et le calcium suivant les degrés d'altération du matériau.

ECHANTILLONS MT3.2. (fig. 3)

Ils correspondent au *matériau marno-calcaire, feuilleté*, au contact des lits de grès ; ce matériau se débite très facilement en petits blocs cubiques plus ou moins calcitisés. L'examen microscopique montre que la matrice est constituée d'un assemblage de feuillets argileux (photos 7-8) formant localement des microagrégats très poreux et très chargés en calcaire. Les bordures externes de ces feuillets, de même que les espaces interfoliaires, sont des sites préférentiels de précipitation et de

(1) Laboratoire de Pétrologie de la Surface — ORSTOM, Bondy, 1987.

croissance de calcite sous forme de fines aiguilles en assemblage désordonné. Le graph. 6 de la figure 4 correspond à la microanalyse d'une de ces plages où l'élément Ca est nettement individualisé. Le balayage de l'échantillon montre par ailleurs de nombreux *grains de quartz* présentant des faciès plus ou moins avancés de calcitisation. La photo 11 rend compte, parmi de nombreuses autres observations, de l'aspect très taraudé de deux de ces grains de quartz d'environ 50 μ de diamètre ; les cristaux sont presque totalement recouverts d'aiguilles de calcite et de petites plaques de calcite micritique en rhomboédres qui semblent se *nourrir* des quartz puis se détacher de ces derniers (photo 14). Dans un cristal non recouvert de calcite, on note la présence exclusive de Si (graph. 7).

L'examen microscopique des *plages carbonatées* de l'échantillon MT3.2 révèle la microagrégation de calcite d'allure « floconneuse ». A très fort grossissement (photo 9), on observe un assemblage de calcite en rhomboédres plus ou moins émoussés avec des précipitations de calcite en aiguilles dans la microporosité de dissolution. La microanalyse rend compte de la nature d'un de ces rhomboédres altérés où à côté du Ca apparaissent des *impuretés* de Fe et de Mn (graph. 8). Dans les plages où la calcitisation est totale, les rhomboédres ont des formes géométriques très nettes et on ne décèle plus à l'analyse que l'élément Ca (graph. 9).

En résumé, les observations microscopiques faites au cours du balayage des différents échantillons MT3.2 montrent que tous les constituants présents sont affectés à des degrés divers par l'élément Ca. C'est ainsi que les *feuillets argileux* constituant la matrice du matériau marneux présentent des calcitisations de bordure et interfoliaire ; que les *quartz* relictuels libérés par l'altération des filons gréseux sont soumis à une calcitisation intense ; que la *matrice carbonatée* elle-même subit des *transformations* en relation apparente avec la micro- et ultra- microporosité du milieu, liées en grande partie à l'affaiblissement des structures géométriques, ou l'*effacement* de certains minéraux. Ces observations vont dans le sens de celles qui ont été faites par de nombreux auteurs, entre autres GILE *et al.* (1966), FLACH *et al.* (1969), PEDRO (1972), SEGHAL *et al.* (1972), NAHON *et al.* (1975), MILLOT *et al.* (1977), BECH *et al.* (1980), TRUC *et al.* (1985), RABENHORST *et al.* (1986), BLANCANEUX *et al.* (1987-1988), HOUMANE *et al.* (1988).

ECHANTILLONS MT3.3 (fig. 3)

Ils correspondent aux filons et/ou aux *plages très carbonatées* poudreuses et pulvérulentes dans lesquelles « flottent » des petites reliques de plaquettes argileuses très calcitisées.

La *matrice carbonatée* de l'échantillon est constituée d'un foisonnement désordonné de *calcite sparitique* en aiguilles (Lublinite) ; chacune de ces aiguilles présente un accroissement linéaire plus ou moins net ; elles peuvent atteindre des tailles supérieures à 10 μ . Au sein de cette masse carbonatée, de petits *agrégats argileux, feuillets*, sous forme de plaquettes, sont encore reconnus et leurs natures minéralogiques confirmées par la microsonde (fig. 4, graph. 6). L'examen à très fort grossissement de ces dernières rend compte de la structure déjà observée en MT3.2, mais avec un degré de calcitisation plus avancée. La photo 8 montre la microagrégation d'une de ces plaquettes argileuses très chargée en calcaire et à très forte microporosité. Une observation fine montre que les microagrégats sont en réalité constitués par un *empilement de feuillets argileux très calcitisés* sur leurs bordures externes, de même que dans les lumières de la porosité interfoliaire. La précipitation et la cristallisation de calcite se font suivant des formes allongées, en aiguilles ou en bâtonnets (2-3 μ), dans un milieu extrêmement riche en calcaire et très poreux.

Le balayage de ces agrégats argileux très calcitisés révèle la présence de cristaux de quartz (photos 13 et 14), plus ou moins calcitisés (graph. 10). Certaines parties altérées des quartz ont été analysées ; le graph. 11 rend compte de la calcitisation avancée d'un quartz où l'élément Ca prédomine sur le cortège silico-alumino-ferrique. Mais les quartz sont également observés au sein même de la matrice carbonatée. Tous ces cristaux relictuels apparaissent alors très largement calcitisés (photos 12, 15, 16 et graph. 12).

En résumé, les observations microscopiques et ultra-microscopiques faites au cours du balayage des différents échantillons MT3.3 montrent un envahissement du milieu par l'élément Ca. Tous les minéraux présents relictuels qui « flottent » au sein de la matrice carbonatée blanchâtre, poudreuse et pulvérulente sont plus ou moins totalement « digérés » et remplacés par la calcite. On assiste globalement à la *disparition de ces minéraux (quartz, argiles...)* et à leur remplacement par la calcite.

La minéralogie des argiles

L'étude minéralogique des argiles (1) a été faite sur les divers échantillons MT3.1, MT3.2, MT3.3 et MT3.4 sur la fraction inférieure à 2 μ du sol total.

Echantillon MT3.1 : L'analyse diffractométrique révèle la prépondérance de la *silice* (quartz, avec des pics très nets à 3,34° et 4,254° ; *cristobalite* à 4,04A°),

(1) Résultats d'analyses diffractométriques effectuées sur la fraction inférieure à 2 μ . Echantillons chauffés, glycérolés. Laboratoire de Minéralogie. ORSTOM, Bondy. G. FUSIL-MILLOT (Mme), Ph. BLANCANEUX, 1987-1988.

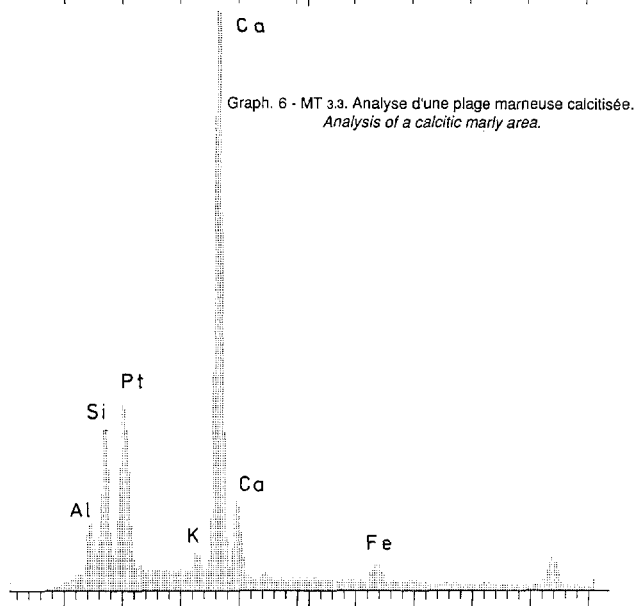
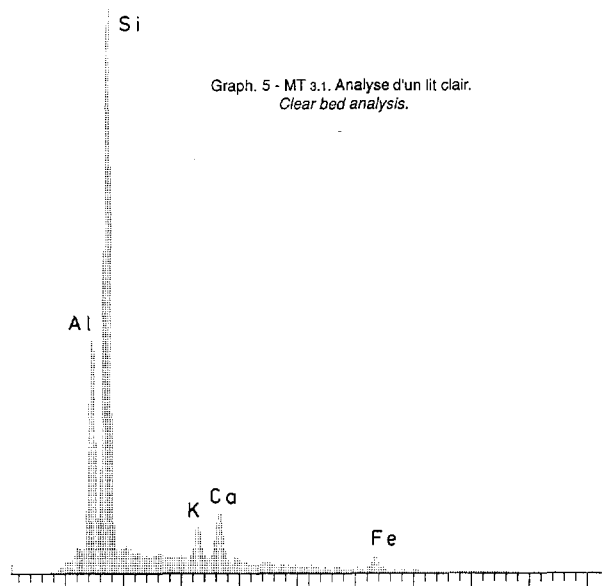
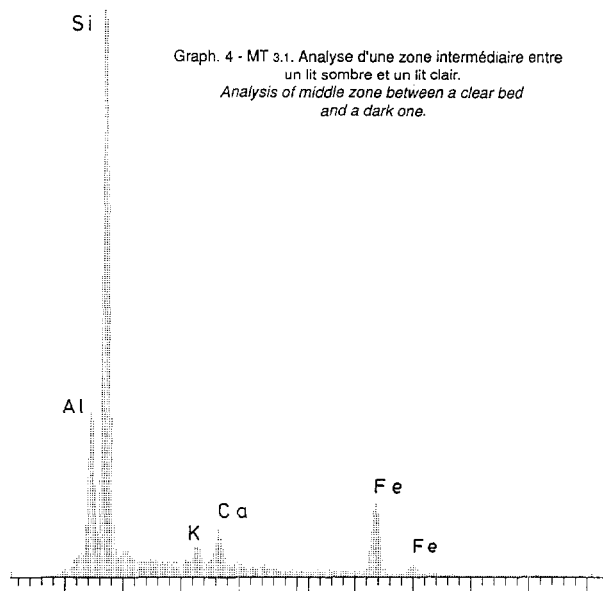
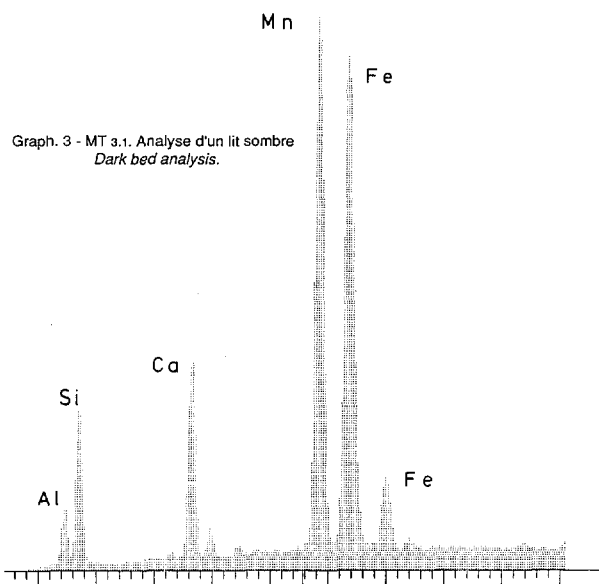
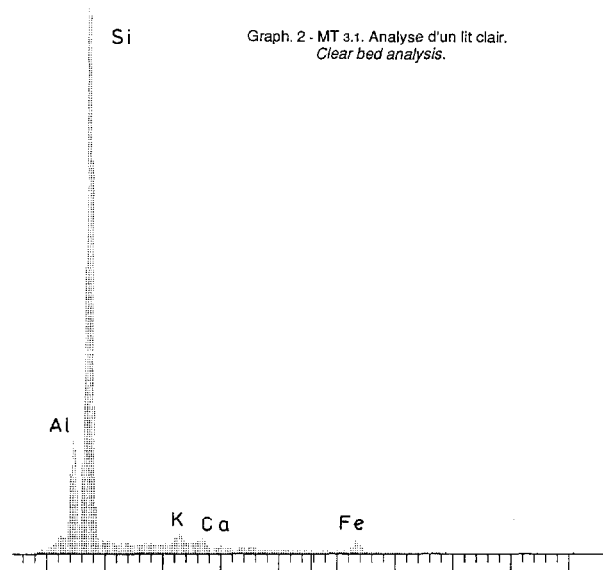
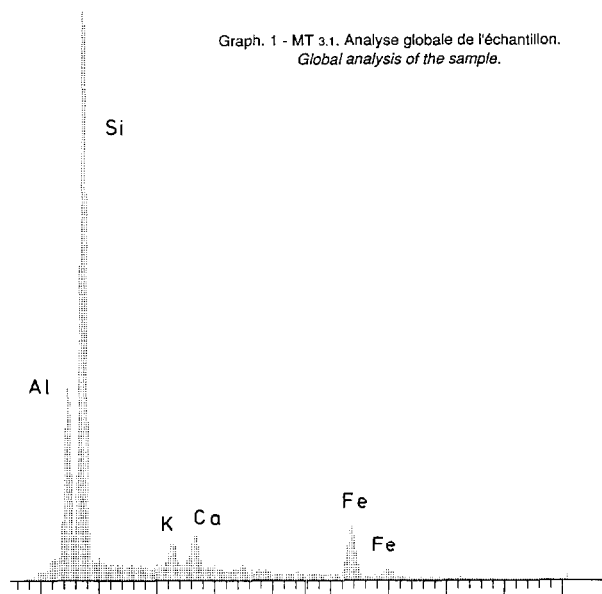


FIG. 4. — Diagrammes d'analyses semi-quantitatives à la microsonde de Link.

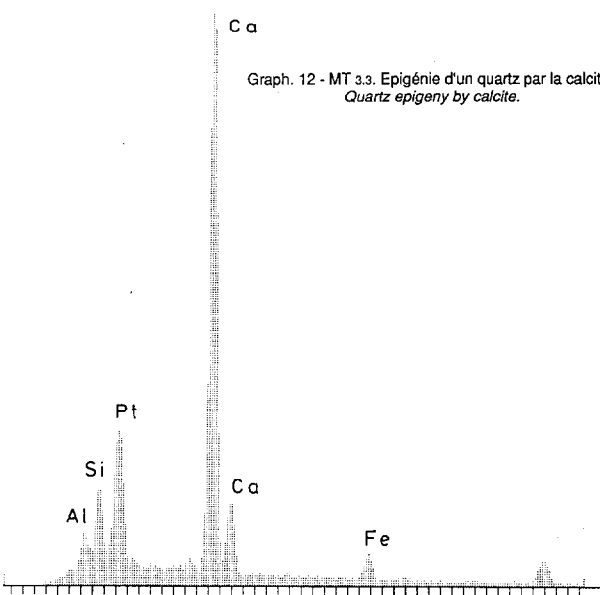
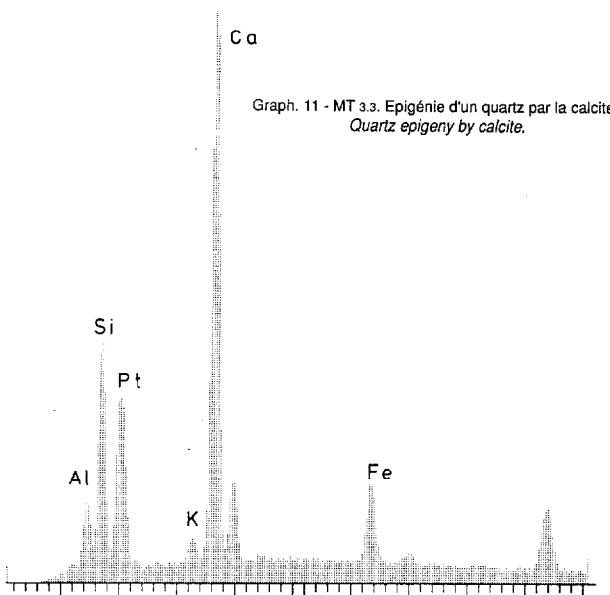
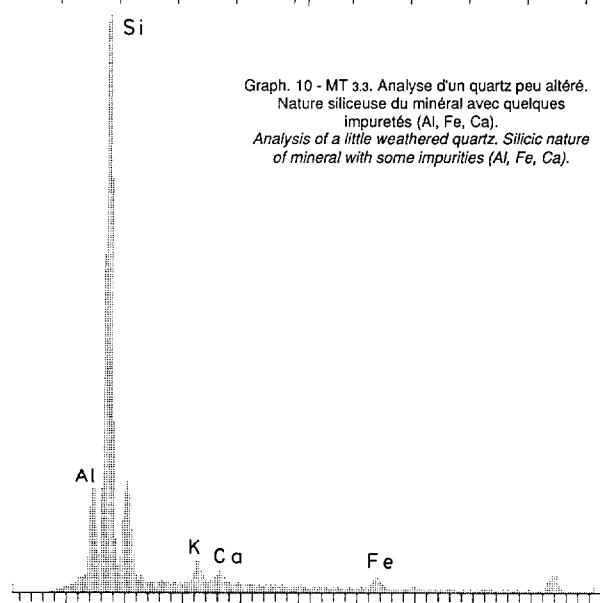
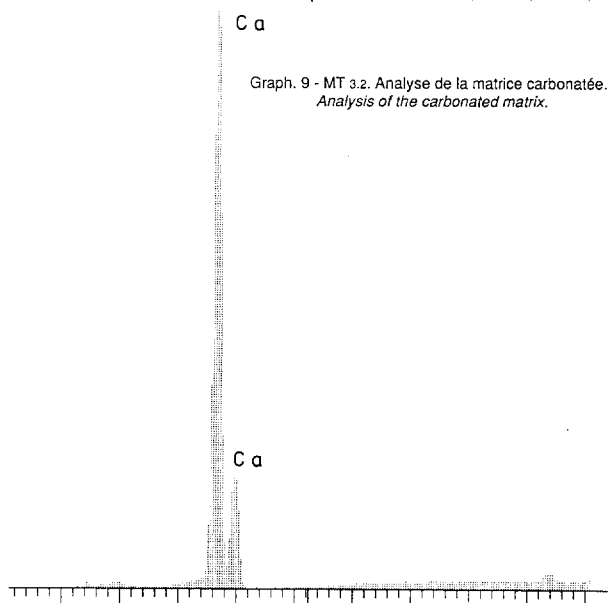
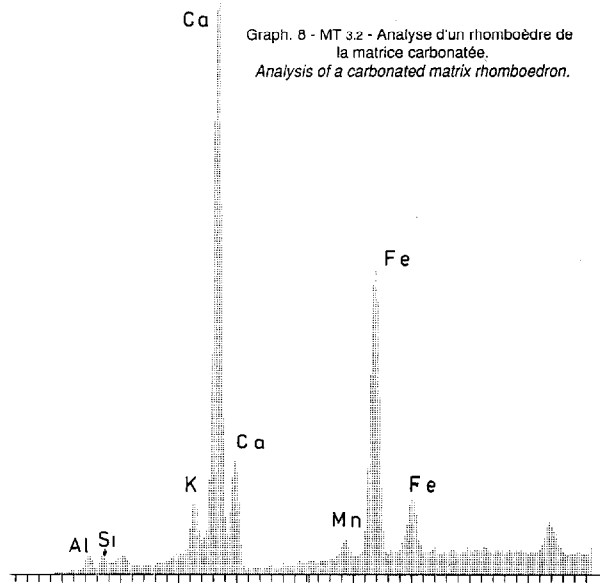
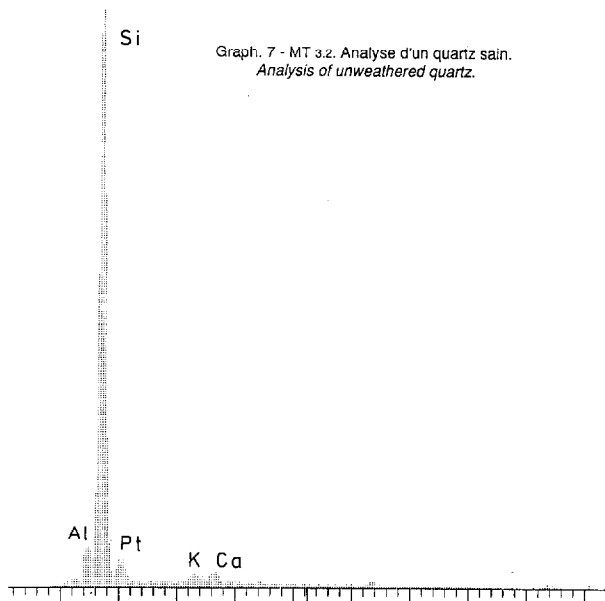


PHOTO 5. — Echantillon MT3.1. Vue à faible grossissement d'un fragment de grès calcaire montrant l'alternance de *lits clairs* et de *lits sombres*, d'épaisseurs millimétriques. L'analyse globale de l'échantillon révèle la prédominance des éléments Si et Al sur les autres constituants présents (K, Ca, Fe). Voir graph. 1.

Weak magnifying power view of a calcareous sandstone chip with alternating clear or dark beds.

PHOTO 6. — Echantillon MT3.1. Observation à fort grossissement d'un *lit clair*. Il s'agit d'un assemblage de fibres d'allures filamenteuses. La microanalyse (graph. 2 et 5) révèle essentiellement du Si et des traces de Fe, Al et Ca.

High magnifying power observation of a clear bed.

PHOTO 7. — Echantillon MT3.2. Observation à fort grossissement d'une *plage argileuse*, marneuse, *très carbonatée*. La matrice apparaît constituée de feuillets d'argile sur les bords desquels se développent des aiguilles de calcite. *Epigénie des argiles par la calcite*. *High magnifying power observation of a marly, much carbonated, clayey area. Epigeny of clays by calcite.*

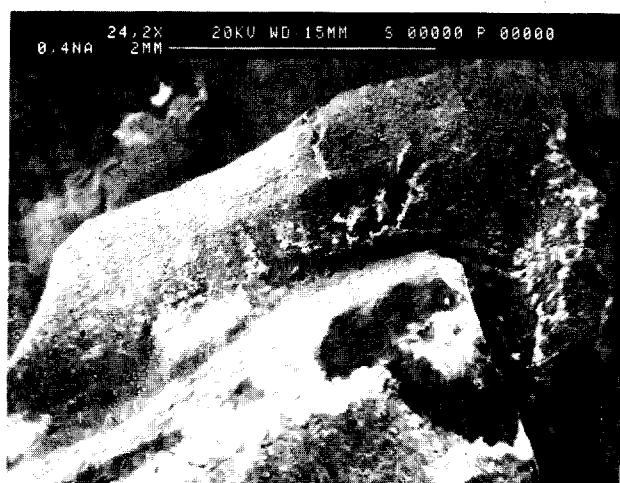
PHOTO 8. — Echantillon MT3.3. Balayage d'une petite *plage argileuse* relique, « flottant » dans la matrice carbonatée pulvérulente de l'échantillon. On observe la précipitation de calcite en aiguilles dans les lumières de la porosité, sur les bordures externes des feuillets argileux, de même que dans les espaces interfoliaires qui sont des sites préférentiels de précipitation et de croissance de la calcite (voir graph. 6). *Epigénie des feuillets argileux par la calcite*.

Scanning of a residual clayey area, "floating" in the powdery carbonated matrix of the sample. Epigeny of the clayey thin sheets by calcite.

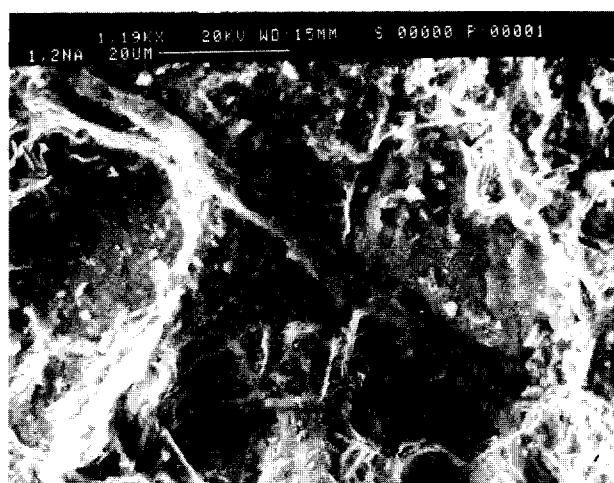
PHOTO 9. — Echantillon MT3.2. Calcite micritique en micro-rhomboèdres très émoussés ; *affaissement des structures géométriques* ; foisonnement désordonné de baguettes et d'aiguilles de calcite sparitique qui constituent la matrice carbonatée pulvérulente du matériau. *Micritic calcite in microrhomboedrons with very taken off edges.*

PHOTO 10. — Echantillon MT3.3. *Plages très carbonatées*, poudreuses et pulvérulentes. La matrice apparaît constituée par un foisonnement désordonné d'aiguilles de calcite sparitique (*Lubline*). Chacune de ces aiguilles présente un accroissement linéaire plus ou moins net, avec des tailles parfois supérieures à 10 μ .

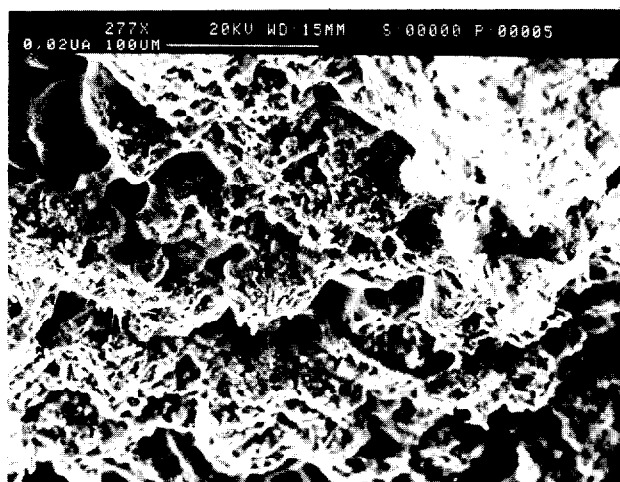
Dusty and powdery much carbonated areas.



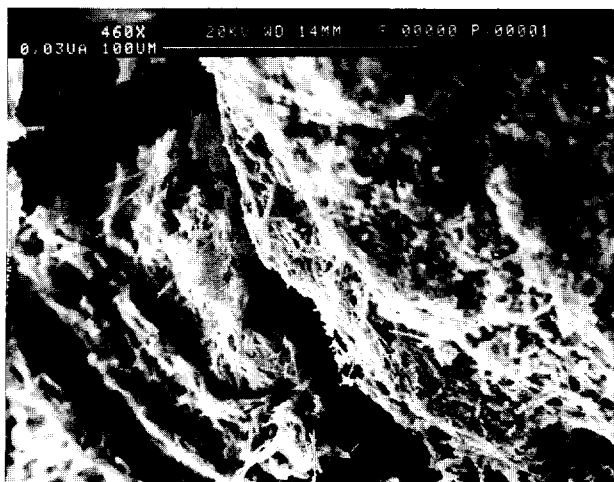
5



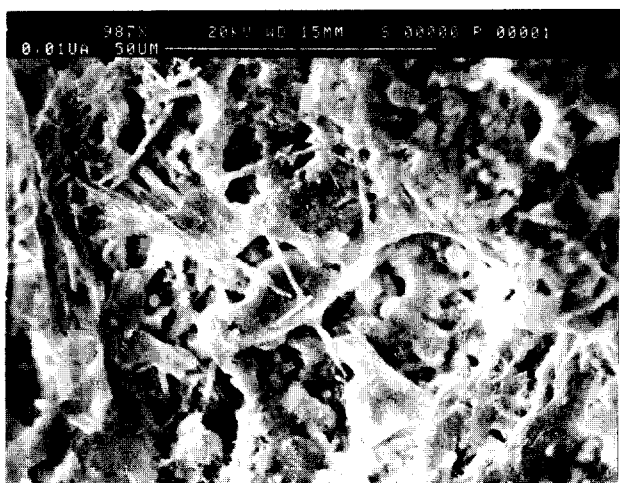
6



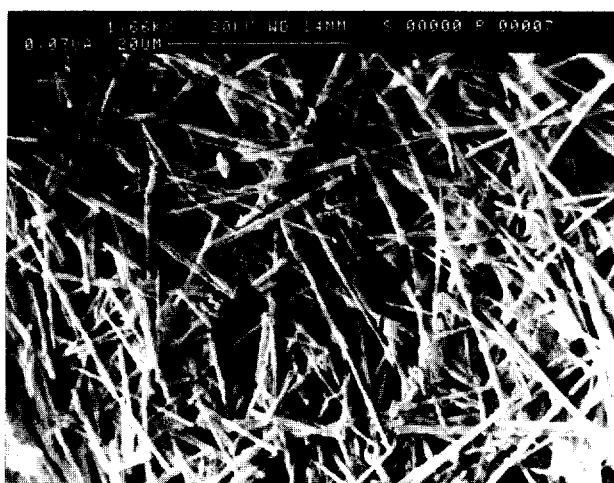
7



8



9



10

PHOTO 11. — Echantillon MT3.2. *Deux cristaux de quartz épigénisés* par la calcite. La cristallisation de calcite en aiguilles se fait dans la microporosité de dissolution des grains de quartz qui ont un aspect très taraudé. La microanalyse des zones non couvertes de calcite (graph. 7) révèle la présence exclusive de Si.

Two quartz crystals, epigenised by calcite.

PHOTO 12. — Echantillon MT3.3. Grain de quartz auréolé d'une gaine de calcite en aiguilles ; certaines de ces aiguilles semblent localement constituer des *ponts* qui relient les grains de quartz entre eux ; consistance pulvérulente du matériau très calcitisé.

Quartz grain haloed with a needlelike calcite sheath.

PHOTO 13. — Echantillon MT3.3. Quartz épigénisé par la calcite. Noter la surface « rugueuse », taradée du minéral localement recouvert de plaquettes argileuses très calcitisées (graph. 10 et 11).

Quartz epigenised by calcite.

PHOTO 14. — Examen à très fort grossissement de la surface d'un grain de *quartz épigénisé par la calcite*. Les nombreux golfes de corrosion et les fissures de dissolution servent de sites de naissance et de croissance à des sphérolites de calcite qui semblent se « nourrir » des quartz, s'individualiser puis se détacher de ces derniers. Quartz envahi par la calcite.

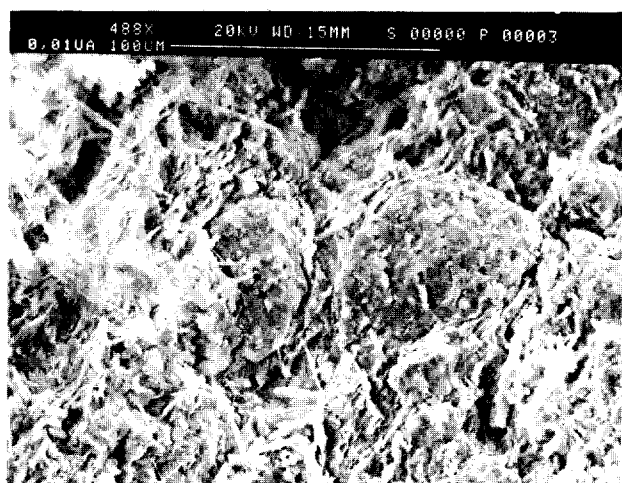
Very high magnifying power examining of the quartz grain surface, epigenised by calcite.

PHOTO 15. — Quartz épigénisé par la calcite, emprisonné dans un foisonnement d'aiguilles de calcite.

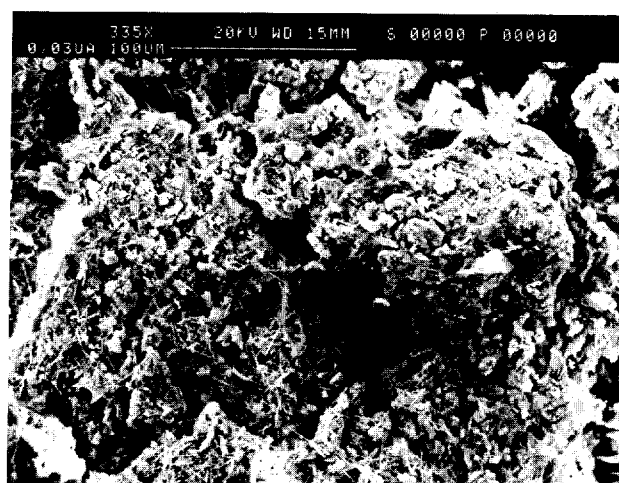
Quartz epigenised by calcite.

PHOTO 16. — Quartz épigénisé par la calcite. Examen à très fort grossissement. La surface du grain de quartz apparaît criblée de pores ultramicroscopiques ($1\ \mu$) ; dans cette nanoporosité intragranulaire, des aiguilles de calcite prennent naissance et se développent. Cette *épigénie* du quartz par la calcite donne un aspect boursoufflé et taraudé au minéral ; dissolution de surface et substitution de calcite au quartz. Le graph. 12 correspond à l'analyse faite sur une zone envahie par la calcite. L'élément Ca prédomine largement.

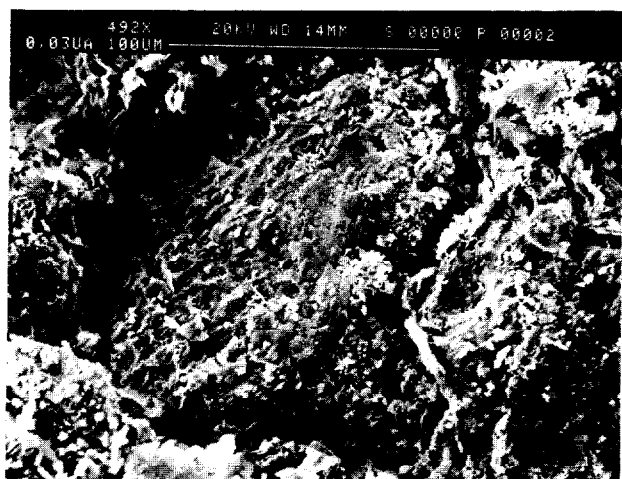
Quartz epigenised by calcite. Very high magnifying power examining.



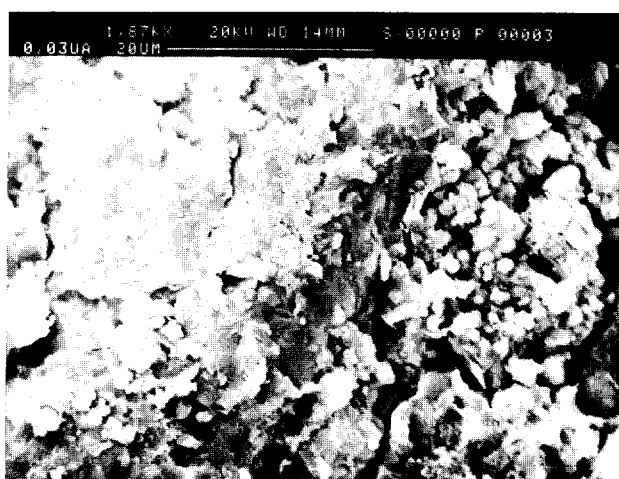
11



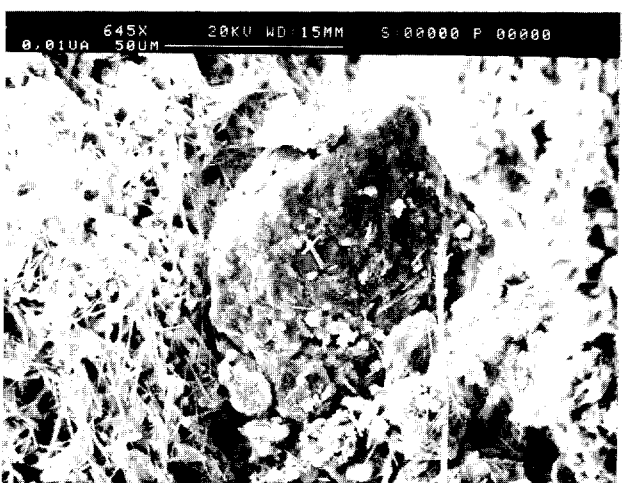
12



13



14



15



16

sur les autres minéraux présents. On note la présence de *feldspaths* ($3,18A^\circ$) et de *calcite* représentée par différents pics de moindre importance à $2,28A^\circ$, $2,45A^\circ$. La présence de minéraux interstratifiés — probablement *smectite-chlorite* — se remarque dans une gamme comprise autour de $14,2A^\circ$. Un peu d'*anatase*, de *kaolinite* et d'*illite* ont été également identifiés.

Echantillon MT3.2 : Les diffractogrammes aux R.X. rendent compte dans cet échantillon de la présence de *quartz* avec des pics très accentués à $3,34A^\circ$ et nets à $4,24A^\circ$; de *cristobalite* ($4,04A^\circ$), de *feldspath* ($3,18A^\circ$), de *calcite* mieux représentée que dans l'échantillon MT3.1 avec des pics nets à $2,28A^\circ$, $2,45A^\circ$ et $3,02A^\circ$. On note également la présence de *kaolinite* avec son pic caractéristique à $7,18A^\circ$, d'*illite* et de *micas* ($10,06A^\circ$). Ici également, la présence de minéraux 2/1 interstratifiés, probablement *illite-smectite* est reconnue dans la gamme comprise en $13,4A^\circ$ et $14,2A^\circ$. L'*anatase* est encore signalée.

Echantillon MT3.3 : Les diffractogrammes rendent compte de l'augmentation des teneurs en *calcite* par rapport aux autres éléments présents et aux autres échantillons précédents. Les pics sont très nets à $3,04A^\circ$, de même qu'à $2,28A^\circ$ et $2,49A^\circ$. Les *quartz* offrent deux pics ($3,34A^\circ$ et $4,27A^\circ$), le premier étant net. La *cristobalite* serait représentée à $4,04A^\circ$. L'*illite* et les interstratifiés *illite-smectite* autour de $13,49A^\circ$. Des traces de *kaolinite* ($7,18A^\circ$) sont signalées tandis que l'*anatase* serait encore présente. Nous constatons ici comme pour l'échantillon MT3.2 mais d'une manière plus nette, l'augmentation des teneurs en argiles par rapport à MT3.1. De faibles traces de *feldspaths* possibles sont encore signalées.

Echantillon MT3.4 : Dans cet échantillon correspondant aux filons et aux amas poudreux et pulvérulents ; les diffractogrammes rendent compte de la prépondérance de la *calcite* ($3,04A^\circ$) sur tous les autres minéraux présents ; les pics sont également très nets à $2,28A^\circ$ et $2,49A^\circ$. On note la relative diminution des *quartz* par rapport aux deux échantillons précédents. On observe également de très faibles traces de *feldspaths*, possibles. L'*illite* et la *smectite* se différencient, tandis que la *kaolinite* et l'*anatase* sont encore signalées.

En résumé, les analyses aux R.X. effectuées pour les quatre échantillons du profil MT3 vont dans le sens des résultats obtenus par la microanalyse et les observations faites au microscope électronique.

De l'échantillon gréseux, peu altéré (MT3.1) où prédomine la *silice* (*quartz*) avec un peu de *calcite*, on aboutit à un matériau quasi totalement calcitisé (MT3.4) dans lequel persiste des indices de *quartz* (ces derniers

ont été visualisés au MEB, « flottant » dans la matrice carbonatée). Il y a en MT3.4 de très faibles traces de *feldspaths* (possibles ?), de même que pour la *kaolinite*. Les échantillons MT3.3 offrent des spectres de transition entre les deux extrêmes, possédant outre les éléments précédemment cités, des *micas* et un cortège plus large de minéraux 2/1, interstratifiés, *illite-smectite*.

Au cours de l'évolution et de la calcitisation du matériau gréso-marneux, on assiste à une augmentation des teneurs en *smectite*. Nos résultats corroborent ceux qui ont été obtenus par RICHE *et al.* (1982) dans les échantillons de sols à encroûtement calcaire dans la région de Bahia au Brésil.

SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS OBTENUS — CONCLUSIONS

Les observations morphologiques sur le terrain, puis microscopiques (loupe binoculaire, microscopies optique et polarisante) et ultramicroscopiques (M.E.B.) couplées aux microanalyses à la microsonde faites par balayage des échantillons depuis MT3.1 jusqu'à MT3.3, ont révélé la transformation progressive du matériau gréso-calcaire en un matériau de plus en plus carbonaté, poudreux et pulvérulent. Il y aurait d'abord altération et argilification des grès favorisées par le litage du matériau et son hétérogénéité texturale. Les pellicules d'oxydation, brunes ou rouille à la surface des blocs gréseux, montrent bien le rôle du fer qui favorise l'éclatement et la fissuration de ces derniers par changement d'état ionique de cet élément au cours de l'alternance des phases d'humectation et de dessiccation (SEGALIN, 1964).

D'une façon générale, tous les constituants présents sont affectés par l'élément Ca à des degrés croissants au fur et à mesure de l'évolution. C'est ainsi que :

— Les *feuilletés argileux* constituant la matrice du matériau marno-calcaire au contact des bancs gréseux (MT3.2) présentent des calcitisations de bordure et interfoliaire. La précipitation et la cristallisation de la *calcite* se font sous des formes diverses qui apparaissent en relation étroite avec la microporosité du milieu. La microanalyse couplée aux observations microscopiques et aux analyses minéralogiques confirment les variations dans la prépondérance du Ca au fur et à mesure de la calcitisation des argiles (*épigénie des argiles par la calcite*).

— Les *grains de quartz* libérés par l'altération des filons gréso-calcaires et reconnus dans tous les échantillons analysés, sont également soumis à une intense calcitisation ; elle se remarque soit par des recouvrements de *calcite* en cristaux de formes et de tailles variables, soit par la précipitation de *calcite* dans la *microporosité de dissolution des quartz*. La microanalyse

confirme également ces observations en montrant la transformation progressive de ces quartz et leur remplacement par la calcite (*épigénie des quartz par la calcite*).

— *La matrice carbonatée* subit elle-même des *transformations*. Elle présente des aspects « floconneux » de calcite micritique (inférieur à 4 μ), en rhomboédres plus ou moins émoussés, ou des formes allongées de *recristallisation de calcite microsparitique* qui s'effectue dans une micro- et ultramicroporosité inter- et intracristalline ; cette dernière étant due, en partie, à « l'affaissement des structures géométriques des cristaux rhomboédriques ». Ces figures de recristallisation restent soumises aux alternances de périodes de dessiccation et d'humectation qui déterminent les conditions de dissolution/précipitation d'un milieu très poreux où *l'ambiance physico-chimique* est saturée en Ca. Les faciès de recristallisation sont par ailleurs fortement conditionnés par *la structure lithologique du matériau*

originel (filons, lits plus ou moins parallèles, alternance de bancs durs et tendres, variations texturales...) qui *oriente* la dynamique des solutions carbonatées percolant dans le sol. Dans cette *dynamique du calcaire*, le rôle du système racinaire (POUGET, 1980-1981) est d'autre part particulièrement mis en évidence. Les racines en effet, en s'immisçant préférentiellement dans les lits les plus tendres (marnes), contribuent *directement* à l'altération du matériau grésocalcaire, en disjoignant les lits les plus résistants des plus tendres et, *alternativement*, à la dissolution du CO_3Ca par accroissement de la tension en CO_2 par respiration des racines et minéralisation de la matière organique, et à *la précipitation des carbonates dissous* en augmentant la concentration des solutions par évapo-transpiration.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 30 mai 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- ABDELJAOUAD (S.), SASSI (S.), TRIAT (J.M.), TRUC (G.), 1987. — Les formations continentales éocènes de Tunisie centrale et méridionale : vastes épandages détritiques profondément transformés par l'épigénie carbonatée d'origine météorique dans l'arrière pays des mers à phosphates. *Géol. Soc. Afr. Conf. PICG, UNESCO*, N° 210.
- BECH (J.), NAHON (D.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.), MILLOT (G.), 1980. — Sur l'extension géographique et climatique des phénomènes d'épigénie par la calcite dans les encroûtements calcaires. Exemple de la Catalogne. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 291 (29 septembre 1980).
- BLANCANEUX (Ph.), HOUMANE (B.), GALLALI (T.), 1987. — Les différents faciès d'accumulations calcaires dans la région orientale de la péninsule du Cap-Bon. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIII, n° 4, 1987 : 253-273.
- BLANCANEUX (Ph.), GALLALI (T.), HOUMANE (B.), TOUMI (M.), 1988. — Les sols à accumulation calcaire de la Tunisie centrale et septentrionale (Notice et carte au 1/500.000). *Rép. Tunis, Labo. Pédol., Fac. Sci. Tunis-ORSTOM, Tunis. multigr.*
- DELHOUME (J.P.), 1980. — L'épigénie calcaire en milieu méditerranéen semi-aride (Jebel Semmama - Tunisie centrale). *ORSTOM, Tunis* (1980). Comm. Réunion. Cristallisation-Déformation-Dissolution des carbonates. Univ. Bordeaux III, Inst. Géodyn., 9 p. *multigr.*
- FLACH (K.W.), NETTLETON (W.D.), GILE (L.H.), CADY (J.G.), 1969. — Pedocementation : Induration by silica, carbonates and sesquioxides in the quaternary. *Soil Sci.* 107 : 442-453.
- FOURNET (A.), 1974. — Etude pédologique de la dorsale tunisienne (transversale Kebir-Bargou-Serdj-Ousseltia). *Revue des sols de Tunisie*, n° 6. DRES, Div. Sols, Min. Agr. Tunis.
- GILE (L.H.), PETERSON (F.F.), GROSMAN (R.B.), 1986. — Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Science* (Baltimore), 101, 5 : 347-360.
- HOUMANE (B.), BLANCANEUX (Ph.), GALLALI (T.), 1988. — Micromorphology of complex nodules in a sand sediment in the N-E of Tunisia. *Univ. Tunis, Fac. Sc., Dépt Sc. Terre, Labo. Pédol.* (1988), 7 p. *multigr.*
- MILLOT (G.), NAHON (D.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.), TARDY (Y.), 1977. — L'épigénie calcaire dans les encroûtements carbonatés en pays subaride, anti-Atlas, Maroc. *Sci. Géol. Bull.*, Strasbourg, 30 : 129-152.
- NAHON (D.), RUELLAN (A.), 1975. — Les accumulations de calcaire sur les marnes éocènes de la falaise de Thies (Sénégal). Mise en évidence des phénomènes d'épigénie. In : « Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale ». *C.R., Strasbourg, U.L.P.T., Vogt éd.* : 7-11.
- NAHON (D.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.), MILLOT (G.), 1975. — Encroûtements calcaires dans les altérations des marnes éocènes de la falaise de THIES (Sénégal). Organisation morphologique et minéralogique. *Sci. Géol., Bull.*, Strasbourg (1975), 28, 1 : 29-46.
- OUERFELLI (K.), 1988. — La fersiallisation dans la région du jebel Bargou (Atlas tunisien Nord-Oriental). *D.E.A. Sc. Terre, Fac. Sc., Univ. Tunis, Labo. Pédol.*, 85 p. *multigr.*, annexes.

- PEDRO (G.), 1972. — Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. *Science du Sol. Bull. AFES*, n° 1 : 5-18.
- POUGET (M.), 1980-1981. — 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 : 235-246.
- RABENHORST (M.C.), WILDING (L.P.), 1986. — Pedogenesis on the Edwards Plateau, Texas. III : New model for the formation of Petrocalcic Horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 693-699.
- RICHE (G.), RAMBAUD (D.), RIERA (M.), 1982. — Etude morphologique d'un encroûtement calcaire. Région d'Irecê, Bahia, Brésil. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XIX, n° 3, 1982 : 257-270.
- RUELLAN (A.), 1971. — Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). Thèse, Univ. Strasbourg. *Mém. ORSTOM*, n° 54, Paris.
- RUELLAN (A.), NAHON (D.), PAQUET (H.), MILLOT (G.), 1977. — Géochimie de la surface et formes du relief. IV : Rôle des encroûtements et épigénies calcaires dans le façonnement du modelé en pays aride. *Sci. Géol., Bull.*, Strasbourg, 30, 4 : 283-288.
- SEGALEN (P.), 1964. — Le fer dans les sols. *Init. Doc. Techn.* 4, ORSTOM, 150 p.
- SEGHAL (J.L.), STOOPS (G.), 1972. — Pedogenic calcite accumulations in arid and semiarid regions of the Indo-Gangetic alluvial plains of Erstwhile Punjab (India). *Geoderma*, 8 : 59-72.
- TOUMI (M.), 1988. — Organisation des accumulations calcaires dans la région du jebel Bargou (Atlas tunisien Nord-Oriental). D.E.A., Sc. Terre., Labo. Fac. Sc., Univ. Tunis, 78 p. *multigr.*, annexes.
- TRUC (G.), TRIAT (J.M.), SASSI (S.), PAQUET (H.), MILLOT (G.), 1985. — Caractères généraux de l'épigénie carbonatée de surface par altération météorique liée à la pédogénèse et par altération sous couverture liée à la diagénèse. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 300, série II, n° 7, 1985.
- TURKI (MM.), 1975. — Etude géologique du massif Serdj-Bargou. Thèse 3^e cycle. Trav. Dépt. Géol. Struct., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 108 p. *multigr.*
- TURKI (MM.), 1975. — Polycinématique et contrôle sédimentaire associé à la cicatrice Zaghouan-Nebhana. Fac. Sc., Univ. Tunis, Dépt. Géol., 252 p.
- TURKI (MM.), 1987-1988 (*Comm. pers.*). — Carte géologique du jebel Bargou au 1/50.000, non publiée.
- ZEBIDI (H.), 1963. — Contribution à l'étude du bilan hydrogéologique du jebel Bargou. Thèse 3^e cycle, Hydro-Géologie. DRE, 66 p. *multigr.*, annexes, Tunis.