

Étude morphologique d'un encroûtement calcaire Région d'Irecê, Bahia, Brésil

Gilles RICHE (1), D. RAMBAUD (1), M. RIERA (2)

(1) *Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France*

(2) *Laboratoires l'OREAL, 93600. Aulnay-sous-bois, France*

RÉSUMÉ

Les formations carbonatées dérivées de calcaire dur d'âge Protérozoïque supérieur sous climatal tropical semi-aride montrent une orientation Est-Ouest et sont étroitement liées à un faciès de calcaire de pendage subvertical finement lité; elles peuvent atteindre jusqu'à trois mètres d'épaisseur. De la base vers le sommet et partant du calcaire sain R, on observe un horizon d'altération isovolume Cca comprenant deux sous-horizons: friable Cca₂, pulvérulent Cca₁, surmonté d'un horizon d'accumulation secondaire de carbonates Bca composé de trois sous-horizons: encroûtements massif friable Bca₃, peu friable Bca₂ et croûte rubannée Bca₁. Ces observations complétées par une caractérisation micromorphologique (lames minces) et nanomorphologiques (MEB) mettant en évidence les types d'organisation cristallographique et les faciès de dissolution et de recristallisation de la calcite (en bâtonnets et en aiguilles notamment) permettent d'aborder l'étude des mécanismes de genèse et d'évolution des horizons d'altération isovolume et encroûtés.

MOTS-CLÉS : Brésil — Encroûtement calcaire — Altération isovolume — Calcite en aiguille — Calcite en bâtonnets.

ABSTRACT

MORPHOLOGICAL STUDY OF A LIME CRUST IN THE REGION OF IRECE, BAHIA, BRAZIL

The carbonate formations derived from hard limestone of upper Proterozoic age under semi-arid tropical conditions show a East-West orientation, are closely related to a thinly imbedded lime facies of subvertical dip and can reach up to three metres in thickness. From the bottom to the top and starting from R pure limestone, an isovolumic weathering horizon Cca is observed with two sub-horizons: one of them being friable Cca₂ and the other being pulverulent Cca₁ and topped by an horizon of carbonate secondary accumulation Bca including three sub-horizons such as a friable massive crust Bca₃, a not very friable crust Bca₂ and a ribboned crust Bca₁. These observations along with a micromorphological characterization (thin laminas) and a nanomorphological one (SEM) which reveal the types of crystallographic arrangement and the facies of dissolution and recrystallization of calcite (mainly in sticks and needles) make it possible to deal with the study of the genesis and evolution of the isovolumic and encrusted weathering horizons.

KEY WORDS : Brazil — Lime crust — Isovolumic weathering horizon — Calcite in needles — Calcite in sticks.

RESUMO

ESTUDO MORFOLÓGICO DE UM ENCROSTAMENTO CALCÁRIO. REGIÃO DE IRECÊ, BAHIA BRASIL

As formações carbonatadas oriundas do calcário da Formação Salitre sob condições de clima tropical semi-árido demonstram uma orientação Leste-Oeste e são estreitamente ligadas a um faciès do calcário com mergulho subvertical

de estratificações finas e cuja espessura pode ultrapassar à 3 metros. Da base para o topo, partindo do calcário sã observa-se um horizonte de alteração isovolúmica Cca incluindo dois subhorizontes: friável Cca₂ e pulverulenta Cca₁ e um horizontes: encrostamento maciço friável Bca₃, pouco friável Bca₂ e crosta calcária Bca₁. Estas observações completadas por uma caracterização micromorfológica (lâminas delgadas) e nanomorfológica (MEV) evidenciando os tipos de organização cristalográfica e os fâcies de dissolução e recristalização da calcita (em bastões e agulhas) possibilitam a abordagem dos mecanismos de gênese e evolução dos horizontes de alteração isovolúmica e de encrostamentos.

PALAVRAS-CHAVES : Brasil — Encrostamento calcário — Alteração isovolúmica — Calcita em agulhas — Calcita em bastões.

Les encroûtements calcaires dont l'extension est importante dans les régions de climats tropical semi-aride et méditerranéen ont fait l'objet de nombreuses études — plus de 460 titres rassemblés par GOUDIE (1971) — complétés depuis par des travaux de synthèse, notamment ceux de GOUDIE (1973) et de REEVES (1976) sous le nom générique de « caliche ». La plupart de ces recherches ont porté sur les répartitions géographique ou climatique des formations encroûtées, sur des observations microscopiques, plus rarement micro-morphologiques (SEGHAL *et al.*, 1972; BAL, 1975). Récemment les travaux de POUGET *et al.* (1980) ont montré les possibilités offertes par la microscopie électronique pour l'étude fine des types de cristallisation de la calcite. Cette étude a pour but de montrer l'intérêt de la combinaison des méthodes d'observation macro, micro et nanomorphologiques pour une meilleure caractérisation des milieux encroûtés carbonatés.

1. LE MATÉRIEL D'ÉTUDE

Les formations calcaires superficielles friables ou non de la région d'Irecê, Bahia, Nord-Est du Brésil (lat. 11°-11°30' S, long. 41°30'-42° W) s'observent en conditions de climat tropical semi-aride : (P.a. 525 mm, Tm.a. 23 °C) (1) dans un paysage de karst couvert faiblement ondulé d'altitude 750 m, avec végétation de caatinga (2) sur calcaire noir très dur, d'âge Proterozoïque Supérieur de la formation Salitre membre A (INDA *et al.*, 1978).

Elles ont été signalées à l'occasion d'études géomorphologiques générales leur conférant une origine lagunaire (TRICART *et al.*, 1968) et de travaux de cartographie des sols sous l'appellation de « C carbonaté » (SNLCS/EMBRAPA, 1978). Depuis lors, des études plus détaillées (SANTOS, 1976; BARRETO, 1977;

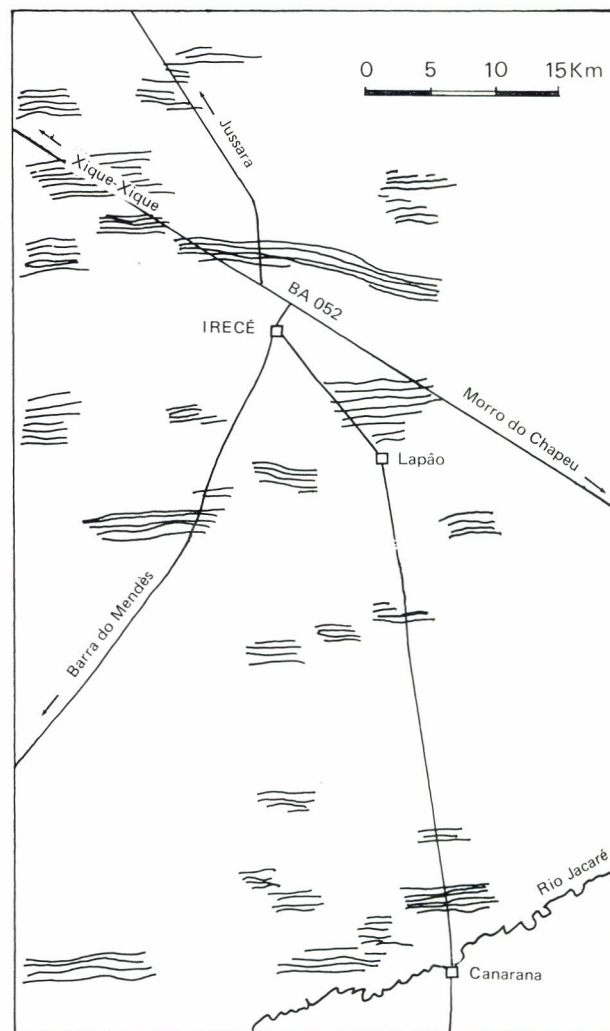


FIG. 1. — Esquisse de la localisation des encroûtements calcaires dans la région d'Irecê, Bahia, Brésil

(1) Pluies d'été irrégulièrement réparties d'octobre à mars et saison sèche de 6 à 7 mois avec nuits fraîches notamment en juillet (moyenne des minimas de 12 °C en hiver austral).

(2) « Végétation caractéristique du Nord-Est brésilien » (ROMARIZ 1974). Strate arborée moyenne dense à dominance d'Acacias sp., de Broméliacées et Cactacées, voisine du Bush de l'Est Africain.

Nou, 1978) leur attribuent une origine pédologique et les identifient comme étant des encroûtements calcaires.

Ces formations carbonatées de un à trois mètres d'épaisseur occupent des ressauts ou sommets d'ondulation étroits (Photo 1), de dix à cinquante

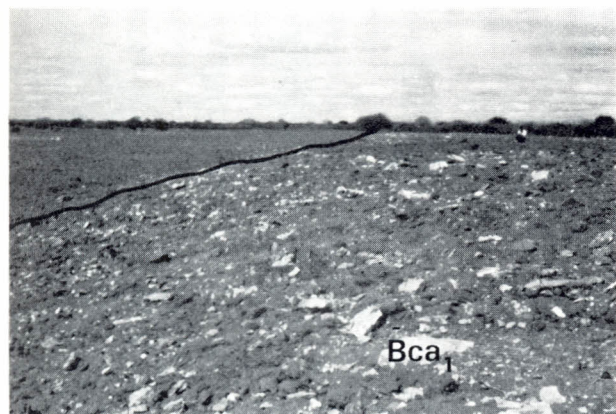


PHOTO 1. — Ondulation avec encroûtement calcaire. Les fragments de croûte rubanée Bca₁ sont bien visibles en surface après défrichement



PHOTO 2. — Calcaire finement lité et d'orientation subverticale caractéristique des ondulations portant les encroûtements. Noter la disposition horizontale de l'encroûtement calcaire

mètres de largeur, formant des lignes plus ou moins parallèles d'orientation E.W (fig. 1). Celles-ci soulignent les rides de compression liées à des poussées tectoniques S.N. ayant affecté le socle calcaire (INDA *et al.*, déjà cité) qui présente alors un faciès finement lité d'orientation subverticale (photo 2).

Les sols dérivés des encroûtements calcaires sont peu épais et classés comme « Cambisols A chernozémico C carbonático » (SNLCS/EMBRAPA, NOU, déjà cités).

Dans ce travail, c'est la description morphologique d'un encroûtement à son stade de différenciation maximum, point de départ pour la compréhension de l'évolution dynamique des encroûtements calcaires, qui est envisagée.

2. LES MÉTHODES D'ANALYSES

2.1. Macromorphologie

La terminologie utilisée par GILE *et al.* (1957) et RUELLAN (1980) a été adaptée pour satisfaire aux

TABEAU I

Correspondance entre la nomenclature utilisée et celle de quelques auteurs pour les encroûtements et altération isovolume calcaires

Horizons	Sous-horizons	DURAND J. H., GILE <i>et al</i>	RUELLAN
	Bca ₁ croûte rubanée	croûte zonaire	K ₂₁ encroûtement feuilleté
Encroûtement Bca	Bca ₂ encroûtement massif peu friable	encroûtement	K ₃₁ encroûtement massif
	Bca ₃ encroûtement massif friable		
Altération isovolume Cca	Cca ₁ Altération isovolume pulvérulente	K ₃₂	—
	Cca ₂ altération isovolume friable	—	—
Calcaire sain R			R ca

caractéristiques particulières des encroûtements calcaires observés dans la région étudiée (tabl. I).

2.2. Micromorphologie

L'observation des lames minces a porté essentiellement sur l'identification des principaux types de cristallisation de la calcite dans les horizons carbonatés (BREWER, 1972; SEGHAL *et al.*, 1972) :

— la sparite de taille supérieure à dix microns, comportant un faciès en « aiguilles » appelé parfois lublinité;

— la microsparite dont la taille est comprise entre quatre et dix microns;

— la micrite dont la taille est inférieure à quatre microns. La micromicrique correspond à un faciès très fin de la micrite.

2.3. Nanomorphologie

La microscopie à balayage (MEB) réalisée sur des échantillons carbonatés non perturbés est un moyen d'investigation très puissant (1) pour l'étude des types de cristallisations de la calcite mais aussi de la dynamique des carbonates (DURAND R., 1978; POUGET *et al.*, déjà cités).

L'identification minéralogique des composés carbonatés et silicatés a été effectuée par diffractométrie de rayons X (2) et la composition chimique élémentaire déterminée par spectrométrie de dispersion d'énergie (3).

3. RÉSULTATS

3.1. Caractéristiques macromorphologiques (fig. 2, photo 3)

L'encroûtement calcaire étudié comprend du haut vers le bas quatre éléments morphologiques facilement identifiables : le sol, l'encroûtement calcaire avec trois faciès distincts, l'altération « isovolume » du calcaire avec deux faciès différents et enfin le calcaire sain. La séquence morphologique se divise donc en horizons et sous-horizons et se présente comme suit :

- en surface : éléments de croûte épars de taille variable :
0-10 cm Horizon A (sol).
Brun foncé (7,5 YR 5/4) argileux, structure forte moyenne

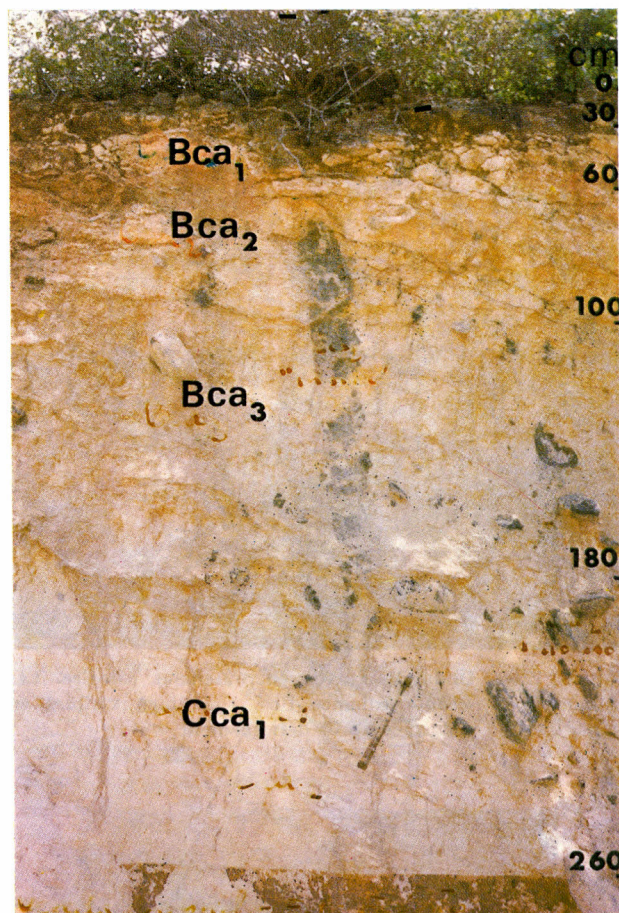


PHOTO 3. — Vue générale de l'encroûtement calcaire. De haut en bas encroûtement calcaire proprement dit comprenant : croûte rubanée Bca₁, encroûtement massif durci Bca₂, encroûtement massif friable Bca₃, altération isovolume pulvérulente Cca₁; non visible ici, l'altération friable Cca₂ et le calcaire sain R. (Noter le filon calcaire d'altération isovolume friable Cca₂ qui se prolonge jusqu'à la base du Bca₁.)

granulaire, décarbonaté dans la masse ; nombreux petits éléments de croûte.

10-30 cm Horizon B (sol).

Brun (7,5 YR 5/4) argileux, structure forte moyenne polyédrique, légèrement carbonaté dans la masse (pseudo-mycélium) ; nombreux petits éléments de croûte.

30-80 cm Horizon Bca (Encroûtement calcaire).

30-60 cm. Sous-horizon Bca₁ (croûte calcaire rubanée).

Croûte calcaire dure constituée de pellicules rubanées très

(1) JEOL 100C avec ASID.

(2) CGR Sigma 80 anticathode Colbalt filtre Fer.

(3) MEB CAMECA avec EDAX.

dures, brun-rouge (5 YR 5/4), de 0,1 à 0,5 cm d'épaisseur, avec une masse carbonatée très poreuse, non friable, blanche (2,5 YR 8/1), de 5 à 10 cm d'épaisseur. L'ensemble présente une stratification horizontale bien marquée. L'interface sol/croûte est constitué par une pellicule rubanée pouvant atteindre 5 cm d'épaisseur, prenant par place l'aspect d'une dalle.

60-100 cm. Sous horizon Bca₂ (Encroûtement massif peu friable).

Pellicules rubanées rares. La masse carbonatée est peu friable, blanche (10 YR 8/2), mais une stratification horizontale ou subhorizontale bien visible.

100-180 cm. Sous-horizon Bca₃ (Encroûtement massif friable).

Absence de pellicules rubanées. La masse carbonatée blanche (10 YR 8/2) devient friable et la stratification horizontale discrète.

180-300 cm. Horizon Cca (Altération isovolume du calcaire).

180-200 cm. Sous-horizon Cca₁ (Altération pulvérulente).

Masse carbonatée pulvérulente (consistance du talc), très blanche (10 YR 8/1) mais ayant conservé par place l'image de la stratification subverticale originelle du calcaire sain.

280-300 cm. Sous-horizon Cca₂ (Altération friable).

Masse carbonatée friable gris-bleuté (10 YR 6/1) montrant intactes les stratifications subverticales du calcaire sain.

300 cm et plus Horizon R (Calcaire sain).

Calcaire très dur, couleur « ardoise », gris foncé (7,5 YR 4/0), finement lité à pendage subvertical.

L'observation macromorphologique définit deux systèmes différents :

a. Un premier système marqué par les structures originelles du calcaire sain mais avec une variation forte de couleur et de consistance : du calcaire sain gris foncé très dur (R),

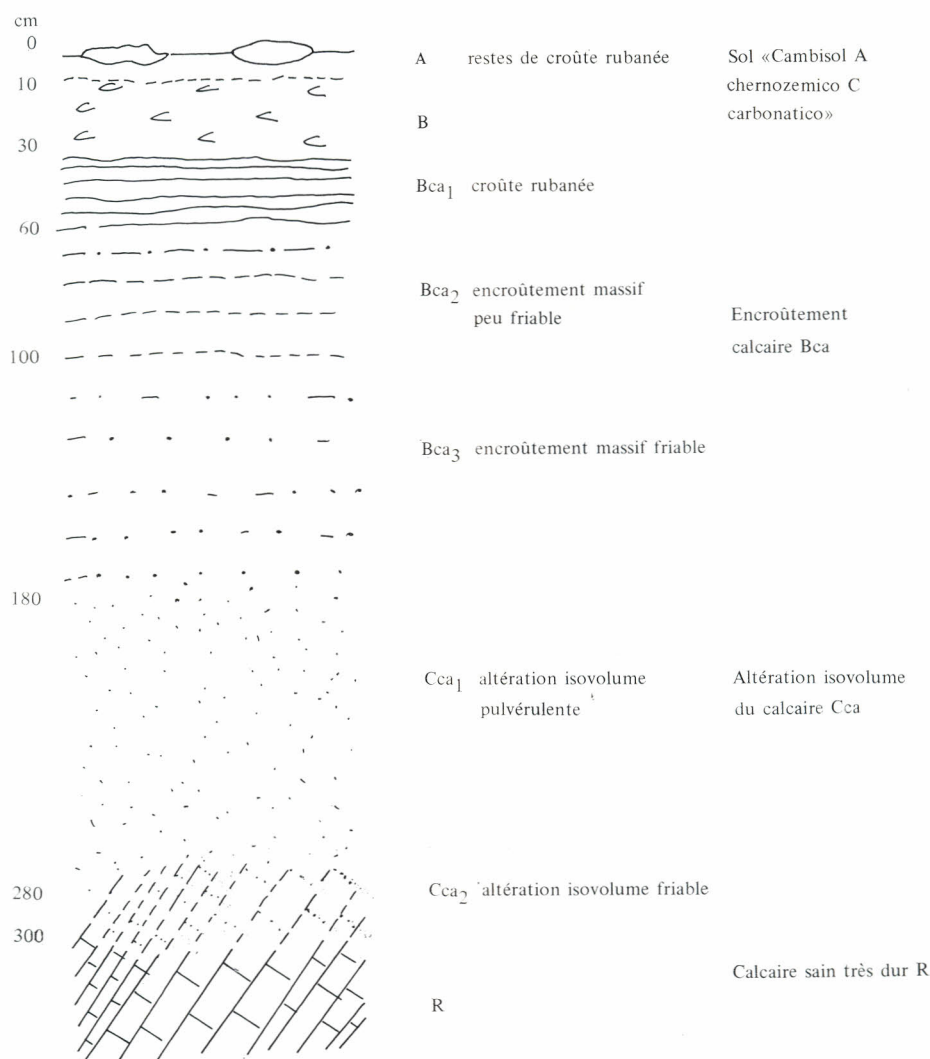


FIG. 2. — Schéma d'une séquence carbonatée complète observée dans la région d'Irecê, Bahia, Brésil (échelles verticales non respectées)

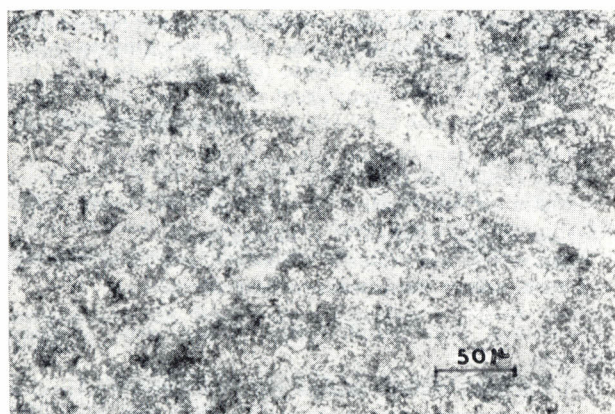


PHOTO 4. — L.P. — Cristalliplasma micritique

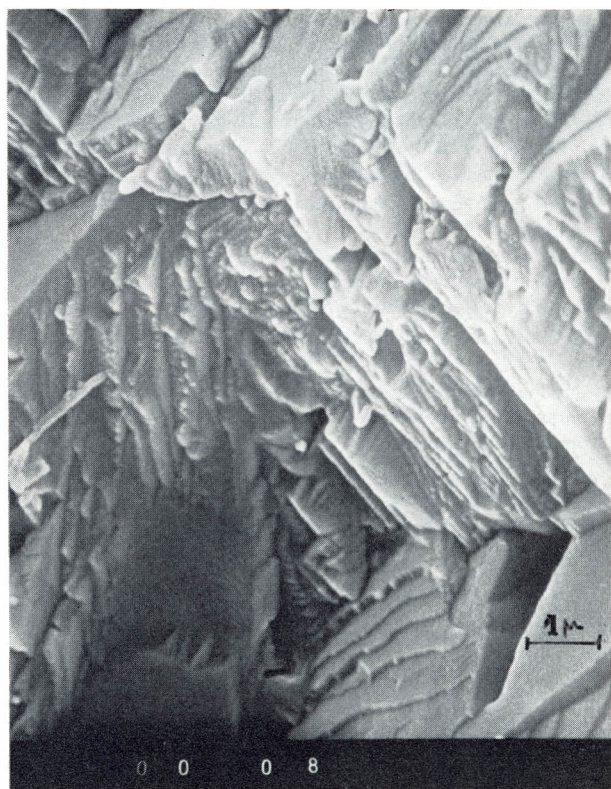


PHOTO 5. — M.E.B. — Calcite micritique étroitement imbriquée

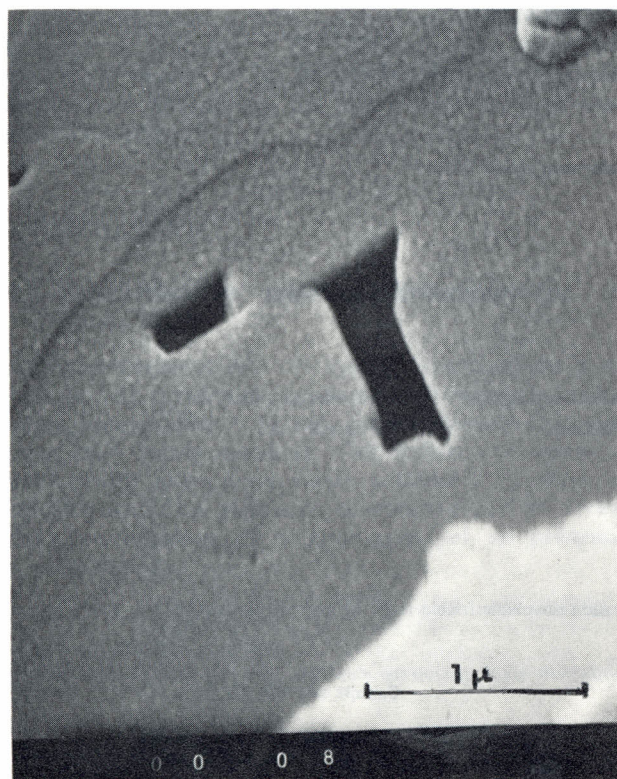


PHOTO 6. — M.E.B. — Microporosité « cristallographique » à la surface d'attaque du calcaire sain. Pores de 0,2 à 1 μm

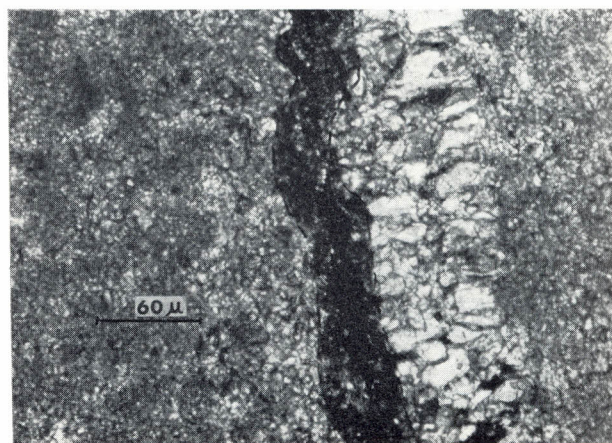


PHOTO 7. — L.P. — La dissolution débute à l'interface micrite/microsparite

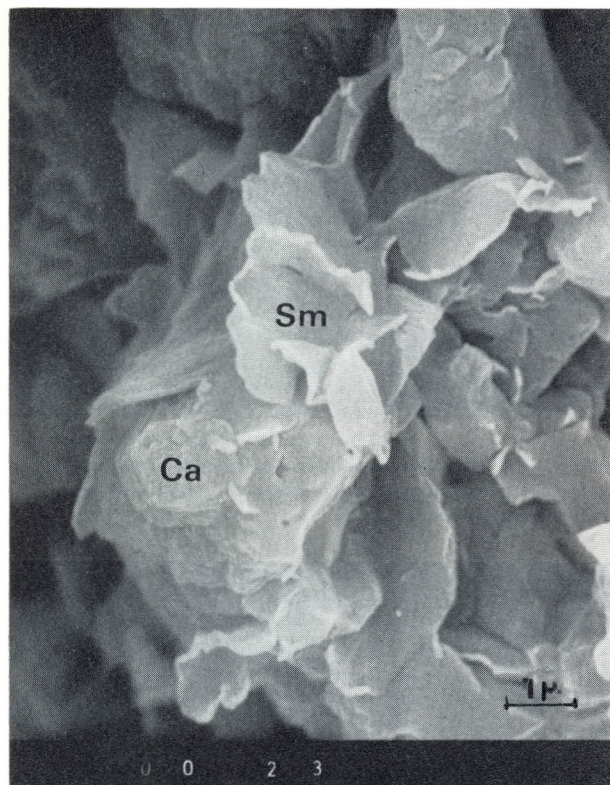


PHOTO 8. — M.E.B. — Ca : cristaux de calcite primaire dis-joints par la dissolution interface. Remarquer les faciès de dissolution différentielle sur les faciès des rhomboèdres

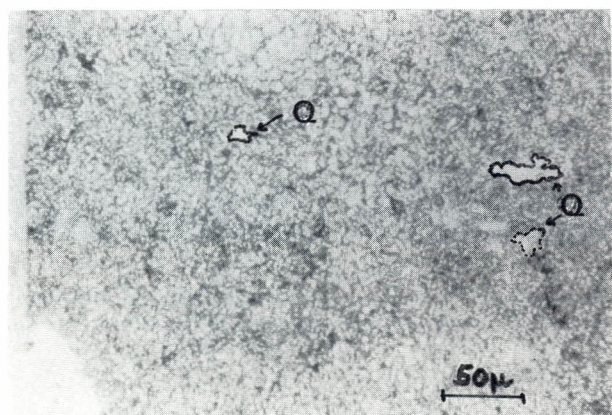


PHOTO 11. — L.P. — Micromicrité dense sans porosité appa-rente. Grains de quartz (Q) en voie de digestion appa-rente par la calcite (épigénie ?)

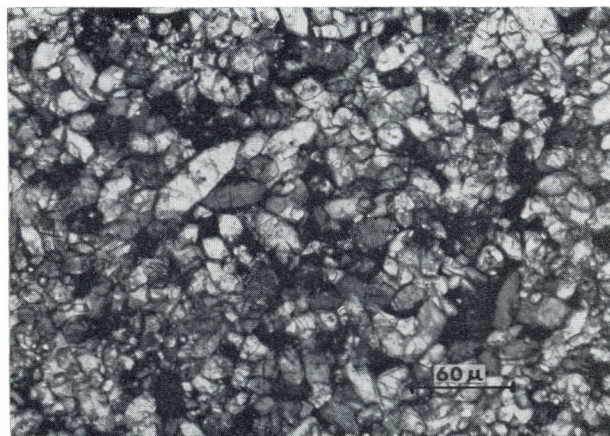


PHOTO 9. — L.P. — Ca : cristaux de calcite primaire émoussés par la dissolution. Sm : smectite (aspect papier froissé) libérée par la dissolution interface des cristaux de calcite

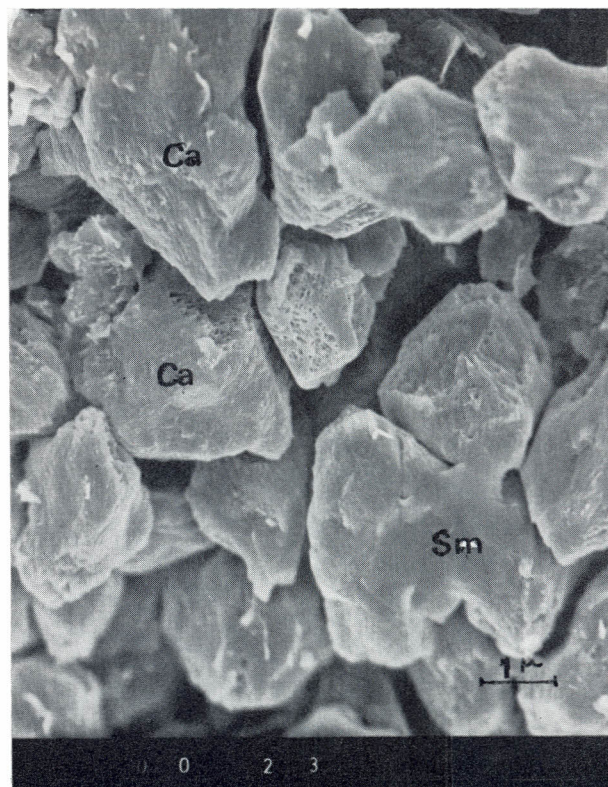


PHOTO 10. — M.E.B. — Les cristaux de microsparite se dis-joignent : la porosité augmente, la consistance est pulvérulente

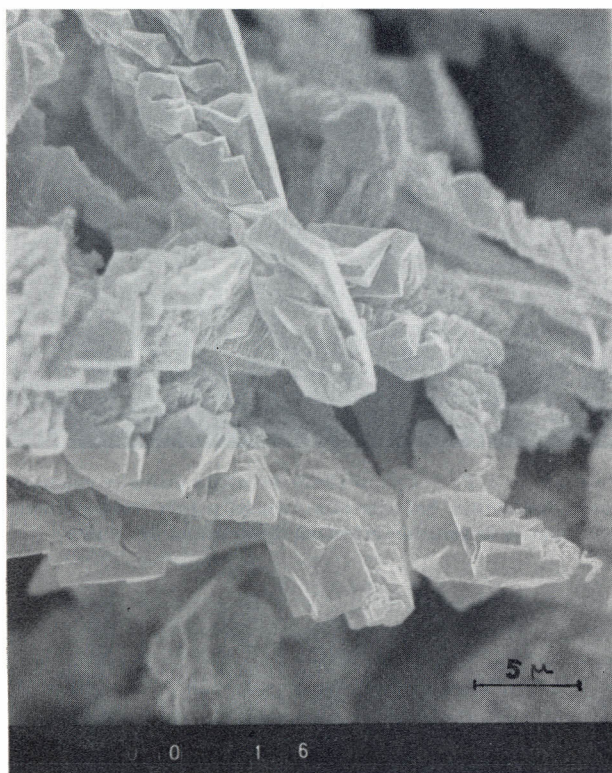


PHOTO 12. — M.E.B. — Micromicrite rhomboédrique secondaire

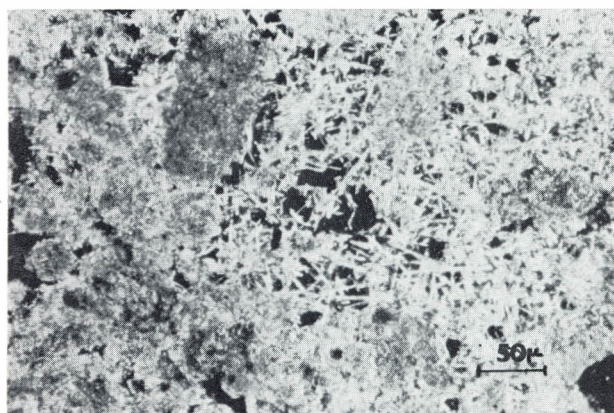
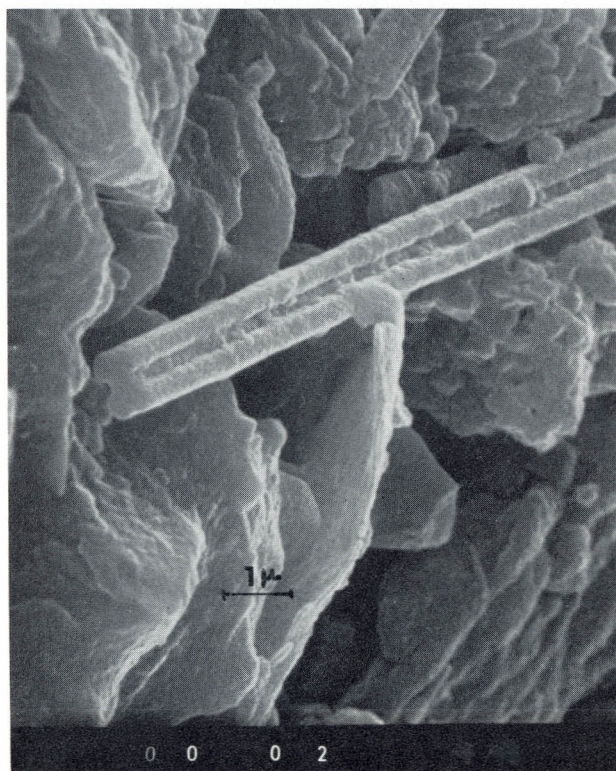


PHOTO 13. — L.P.
— Micromicrite secondaire en dissolution (« en îlots »)
— Calcite en aiguilles occupant la macroporosité

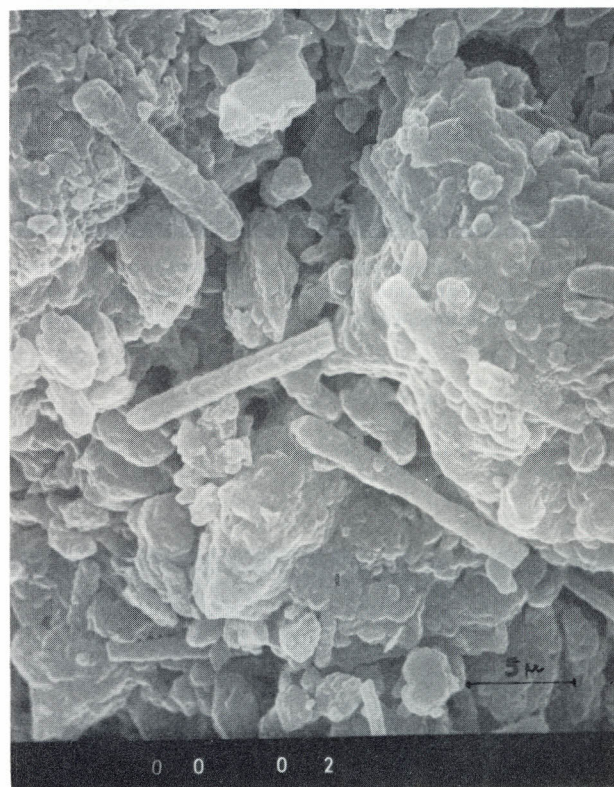


PHOTO 14. — M.E.B.
— Micromicrite rhomboédrique secondaire en voie de dissolution
— Aiguilles de calcite dans la porosité

←

PHOTO 15. — M.E.B. — Aiguilles de calcite avec structure d'agradation linéaire sans relation aux parois des pores constituées de micromicrite rhomboédrique secondaire en dissolution

on passe successivement au calcaire en voie d'altération isovolume, de couleur gris bleu, friable (Cca_2), puis à l'altération blanche pulvérulente (Cca_1) où cependant les structures initiales du calcaire sain sont encore bien reconnaissables.

Ce type d'altération d'une grande netteté et fréquente dans toute la zone étudiée paraît être un fait original, les horizons concernés n'ayant pas reçu de dénomination particulière de la part des spécialistes des encroûtements calcaires (tabl. 1).

- b. Un deuxième système se réfère à l'encroûtement proprement dit, avec une zonation horizontale ou subhorizontale dont la netteté s'accroît en remontant du Bca_3 au Bca_1 , s'accompagnant d'une augmentation de la compacité de la base au sommet de l'encroûtement. Ceci suggère une variation dans la redistribution des carbonates dans les sous-horizons de l'encroûtement.

Une interprétation entre les deux systèmes est fréquemment observée, le calcaire sous sa forme d'altération isovolumique friable pouvant se conserver jusque dans le Bca_1 (photo 3).

3.2. Caractéristiques micromorphologiques

Du calcaire sain au sommet de l'encroûtement, les aspects micromorphologiques observés sont les suivants :

— *Calcaire sain B* (photo 4) : calcaire micritique traversé de veines de microsparite sans porosité visible. Rares éléments de quartz épigénisés (?) par la calcite (faciès géologique);

— *altération isovolume friable Cca_2* (photo 7) : même aspect que le calcaire sain mais avec présence d'une porosité de dissolution à l'interface micrite-microsparite;

— *altération isovolume pulvérulente Cca_1* (photo 9) : apparition d'une organisation micritique de fonte de la calcite primaire avec cristaux non jointifs : pas d'agradation de calcite secondaire;

— *encroûtement massif friable Bca_3* : cristalliplasma micromicritique secondaire sans orientation visible, englobant de nombreux cristaux de microsparite primaire. Faible porosité de fissure. Taches diffuses de couleur brun rouge (1);

— *encroûtement massif peu friable Bca_2* (photo 11) : cristalliplasma microcritique secondaire d'orientation peu visible, dominant et englobant des cristaux de microsparite primaire peu nombreux. Faible porosité de fissure. Taches diffuses de couleur brun rouge (1);

— *croûte rubanée Bca_1* (photo 13) : cristalliplasma micromicritique secondaire englobant de rares cris-

taux de micrite primaire avec forte porosité en partie ou totalement occupée par des aiguilles de calcite (lublinite) dont la longueur varie de 40 à 150 microns et la largeur de l'ordre de 0,5 micron. Les quasicutanes sont bien marquées autour des pores ainsi que les teintes brun rouge dans les pellicules rubanées.

L'observation micromorphologique montre donc essentiellement :

(a) une diminution de la taille des cristaux de calcite en passant du calcaire sain à l'altération isovolume, puis à l'encroûtement;

(b) une dégradation par dissolution de la calcite primaire dans les altérations isovolumes et une réorganisation complète (micromicrite secondaire) dans les encroûtements;

(c) au sommet de l'encroûtement, l'augmentation de la porosité s'accompagne de la présence de cristaux de calcite en aiguilles.

3.3. Caractéristiques nanomorphologiques

L'observation au microscope à balayage d'échantillons non perturbés de la séquence carbonatée met en évidence trois faciès principaux de calcite (2) en rhomboédres, en aiguilles et en bâtonnets.

LA CALCITE EN RHOMBOÈDRES

— la calcite primaire se présente sous la forme d'un réseau de cristaux rhomboédriques de 1 à 2 microns, de taille moyenne, étroitement imbriqués dans le calcaire sain (photo 5) ou disjoints dans l'altération isovolume Cca (photos 8 et 10) avec des faciès de dissolution.

— la calcite secondaire est constituée de micro-rhomboédres de 0,3 à 0,8 microns, d'aspect morphologiques variés (photos 12 et 14) et caractérise les encroûtements massifs friables et peu friables (Bca_3 et Bca_2).

LA CALCITE EN AIGUILLES

— Elle est observée dans la macroporosité de la croûte rubanée Bca_1 (photos 13, 14 et 15) et dans l'horizon B du sol surmontant la croûte où elle forme les « pseudomycéliums » de la microporosité inter-agrégats (photo 21). Les aiguilles de calcite peuvent dépasser 150 microns de longueur et présentent une structure d'accroissement linéaire nette sans orientation par rapport à l'environnement poral (photos 15 et 21). Une variété de calcite en « aiguilles

(1) Les taches diffuses comme les « quasi cutanes » constituent à des degrés divers le résidu de la dissolution des carbonates : silicates d'alumine et hydroxydes, mais dont les faibles proportions n'ont pu être décelées à la spectrométrie de dispersion d'énergie.

(2) La spectrométrie de rayons X ne décele pas la présence d'aragonite dans les structures en aiguilles ou en bâtonnets et les analyses à l'EDS-EDAX ne révèle pas de Magnésium dans tous les types de cristallisation.

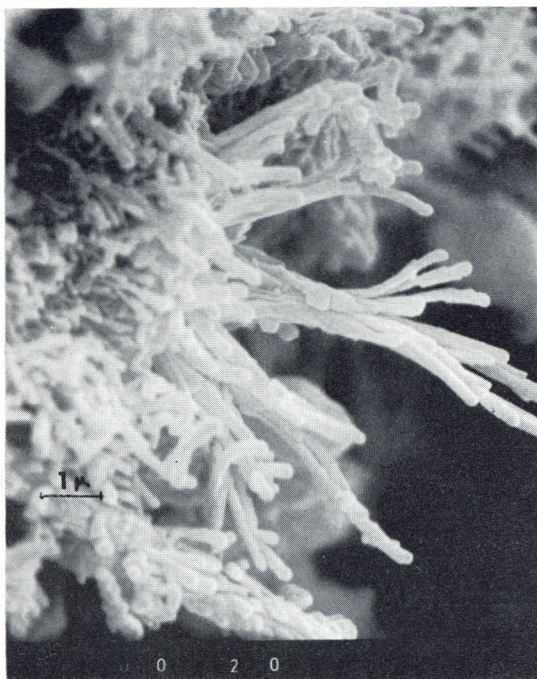


PHOTO 16. — M.E.B. — Aiguilles de calcite « flexueuses » dans zone de forte porosité (Noter les intervalles d'accroissement des aiguilles)

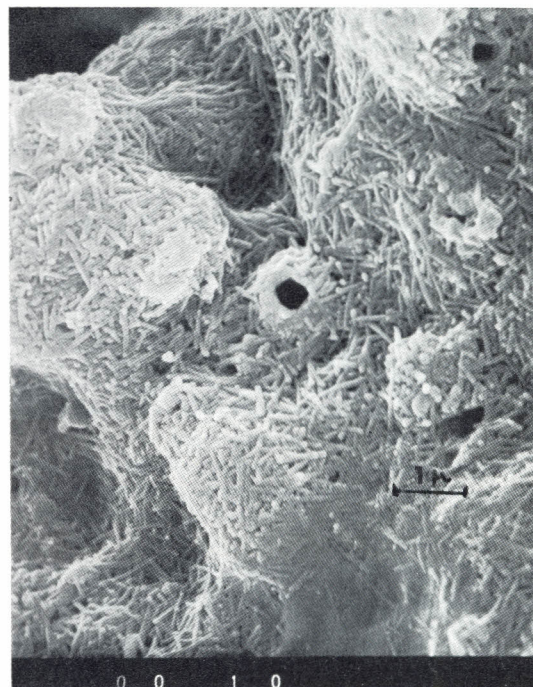


PHOTO 17. — M.E.B.
— Bâtonnets de calcite disposés en « nids de pie »
— L'amas sphérique central avec orifice correspond à une forme organisée fossilisée indéterminée

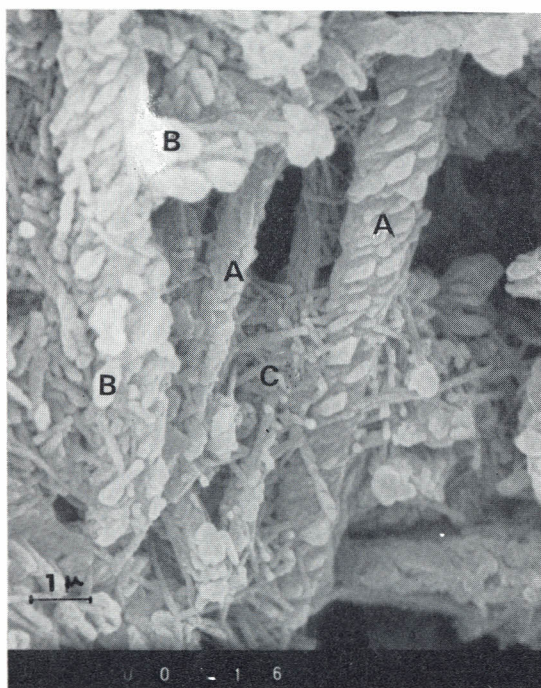


PHOTO 18. — M.E.B. — Présence de 3 « générations » de calcite.
A : filons de micrite primaire résiduels, B : micromicrite secondaire, C : calcite en bâtonnets

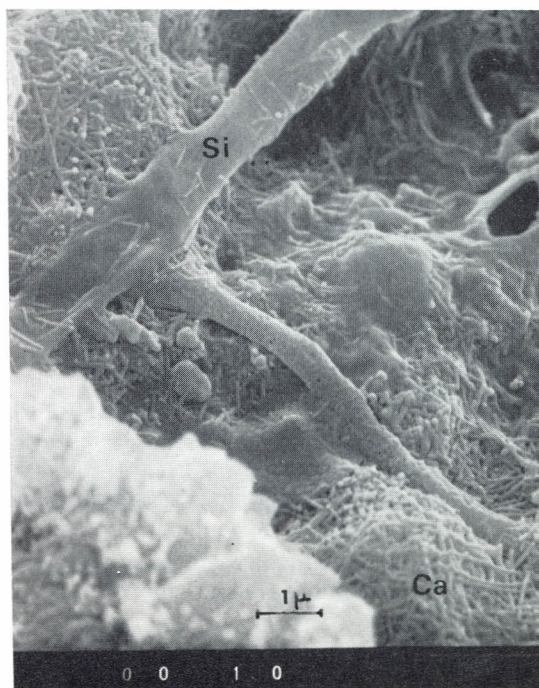


PHOTO 19. — M.E.B. — Silice secondaire Si en filaments ou plaquettes allongées responsables de la cohésion forte de la croûte rubanée. Noter (les dépôts superficiels de calcite Ca en bâtonnets)

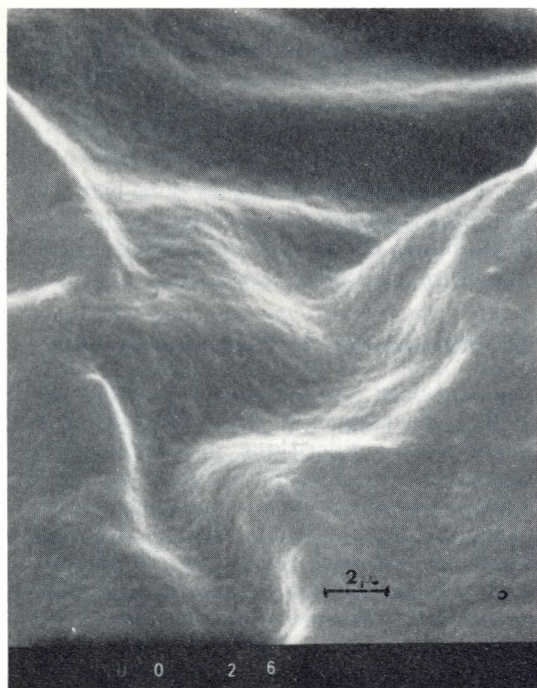


PHOTO 20. — M.G.B.

— Dalle siliceuse à la partie supérieure de la croûte rubanée Bca₁
— Succession de dépôts de silice mal cristallisée. (Noter les formes arrondies de la surface de la dalle)



PHOTO 22 a. — Dissolution forte avec aspect en alvéoles à l'interface croûte rubanée/sol



PHOTO 22 b. — Dissolution faible à l'interface croûte rubanée/atmosphère

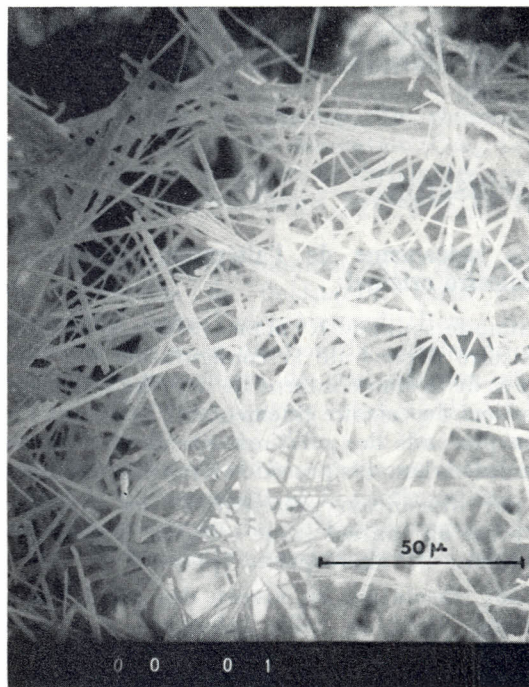


PHOTO 21. — M.E.B. — Aiguilles de calcite dans la macroporosité avec orientation sans relation aux parois des pores (pseudo- mycélium)

flexueuses» occupe les micropores de la croûte entre les pellicules rubanées quand celles-là n'ont d'autre appui que leur support initial (photo 16).

LA CALCITE EN BÂTONNETS

— Elle est observée en abondance dans les faciès à forte porosité des fragments de croûte en dissolution (photo 17). Les bâtonnets de forme aplatie avec des extrémités rhomboédriques ne dépassent pas un micron de longueur. Ils sont formés d'une succession de microrhomboèdres disposés linéairement. Leur arrangement est désordonné bien que leur ensemble paraisse épouser fidèlement les formes de dissolution de la croûte. Ils correspondent aux éléments calcitiques formant les « nids de pie » observés par *POUGET et al.* (1980) dans les encroûtements d'Algérie.

— Les données de la macromorphologie confirment et précisent les observations faites à l'occasion de l'étude micromorphologique sur le polymorphisme des cristallisations calcitiques. Ainsi, dans le cas fréquent où des « filons » de calcite primaire sont encore présents dans la croûte calcaire, différentes « générations » de calcite peuvent être identifiées (photo 18).

Remarque sur l'individualisation de la silice

Des faciès siliceux : en filaments, en plaquettes sont observés dans les zones de dissolution de la croûte (photo 19). Les dalles très dures observées parfois à la partie supérieure de la croûte sont essentiellement constituées par de la silice mal cristallisée (photo 20).

4. DISCUSSION

4.1. Le mécanisme de l'altération isovolume du calcaire originel

Comme le souligne KUBLER (1976) « la dissolution du calcaire dépend de la configuration des écoulements et de la trame interne de la roche », le pendage subvertical du calcaire finement lité facilitant l'infiltration profonde des solutions circulantes. La dissolution des carbonates procède alors selon deux voies :

— par dissolution préférentielle au niveau des micropores au contact (zone critique) plasma micritique-veines de microsparite (photo 7);

— par dissolution au niveau des pores cristallographiques dont la taille inférieure à 1 micron (photo 6) suppose une circulation des solutions selon les lois capillaires et donc une diminution de l'énergie libre de l'eau au contact de la calcite de la paroi des pores.

L'altération en masse du calcaire correspond en

réalité à une dissolution de bordure de la micrite s'accompagnant de la libération de la smectite auparavant piégée dans le plasma micritique et qui va jouer le rôle de joint souple entre les cristaux : il y a « fragilisation » de l'ensemble mais sans modification notable du volume initial (photos 8 et 10). Ce type d'altération isovolume est donc bien différent de l'altération isovolume de certaines roches basiques ou ultrabasiques où les minéraux altérés conservent leur structure cristalline originelle.

4.2. La différenciation de l'encroûtement Bca

L'augmentation graduelle de la cohésion du Bca₃ vers le Bca₂ s'accompagne d'une diminution relative du cristalliplasma micritique primaire par rapport au cristalliplasma micromicritique secondaire dense à très faible porosité donc à forte cohésion.

Par contre, dans la croûte Bca₁ le cristalliplasma micritique est en pleine dissolution, la porosité augmente et la forte cohésion est assurée essentiellement par un squelette siliceux secondaire (photo 19) pouvant se transformer par place au contact avec le sol en une dalle siliceuse très dure (photo 20). Cette individualisation de la silice est facilitée par la réaction neutre à légèrement alcaline du milieu (*CALLOT et al.*, 1978).

4.3. Les relations entre la dynamique de la séquence carbonatée et la morphologie

L'ALTÉRATION ISOVOLUME ZONE DE DÉPART DES CARBONATES

Dans l'horizon Cca, la micrite primaire est largement dominante et présente des faciès de dissolution. L'observation montre que ce niveau reste constamment humide au cours de l'année. Il constitue donc une zone privilégiée de départ des carbonates qui peuvent soit être évacués en profondeur, soit nourrir la base de l'encroûtement en fonction du sens du flux des solutions.

L'ENCROÛTEMENT MASSIF ZONE DE RÉORGANISATION DES CARBONATES

Les sous-horizons Bca₂ et plus spécialement Bca₃ plus éloigné de la surface sont soumis à des variations graduelles mais cycliques des conditions hydriques. La microporosité très fine y favorise la concentration lente et régulière des solutions carbonatées provenant soit de l'altération isovolume soit de la croûte rubanée avec formation de cristalliplasma micromicritique (photo 11), (*DURAND R.*, déjà cité). Ce processus s'accompagne d'une imbrication étroite des cristaux de calcite secondaire néo-formés avec les cristaux de calcites primaires résiduels ainsi que d'une « digestion » apparente des grains de quartz par la micro-

micrite (photo 11). Ces observations sont à rapprocher des phénomènes d'épigénie étudiés dans des milieux semblables par RUELLAN *et al.* (1975).

LA CROÛTE RUBANÉE : ZONE DE DISSOLUTION INTENSE DES CARBONATES

L'intensité des processus de dissolution

Elle se manifeste par une augmentation très forte de la porosité dans les croûtes et par la présence dans le sol de nombreux éléments de croûtes disjoints. Elle doit être due pour une part importante à des produits de dégradation de l'humus. En effet, les teneurs en matière organique des sols sur encroûtement sont élevées (de 6 à 12 %), et la production de nitrate forte pendant la saison des pluies (RIBEIRO *et al.*, à paraître) favorise une dissolution accélérée des carbonates (DURAND R., déjà cité). L'observation des faciès de dissolution à l'interface sol-croûte (photo 22 a) et à l'interface sol-atmosphère (photo 22 b) sur les éléments de croûte résiduels dispersés à la surface du sol confirme la réalité de ce processus.

Les figures de dissolution

Les cristallisations en aiguilles des micropores ont une existence fugace : elles se forment au cours des épisodes secs et se dissolvent pendant les épisodes humides (observation faite sur lame mince). Elles seraient le résultat d'une cristallisation très rapide de solutions sursaturées avec évaporation intense (DURAND R., déjà cité). Elles se forment à partir de la dissolution du cristalliplasma micromicritique et par agragation linéaire (photo 15). Ceci est vérifié par l'observation d'aiguilles de calcite de longueur très variables dans les zones de dissolution intense (photo 13). Dans la porosité du sol sus-jacent les aiguilles de calcite sont les composantes essentielles des pseudomycéliums (photo 15). Elles se forment à partir des solutions « per ascensum » ayant été en contact avec la croûte.

Les cristallisations en bâtonnets sont abondantes dans la microporosité de la croûte, mais aussi à la surface des éléments de croûte très poreux en voie de dissolution avancée. Elles se formeraient lors d'alternances d'humectation et dessiccation rapides au cours de la saison des pluies (photo 17) puisqu'on les observe même sur des échantillons prélevés au cours d'épisodes pluvieux. La présence de composés organiques abondants à ce niveau serait favorable à leur apparition (DURAND R., déjà cité).

5. CONCLUSION

L'encroûtement calcaire étudié est développé à partir d'un calcaire très dur mais dont la texture finement litée et le pendage subvertical favorisent une altération en masse importante appelée iso-volume; d'abord friable (Cca_2) puis pulvérulente (Cca_1), elle conduit à la formation d'une masse calcaire pulvérulente particulièrement sensible aux processus de solubilisation et de mobilisation de la calcite à l'origine de l'encroûtement important qui le surmonte, encroûtement qui devient de plus en plus cohérent à mesure que l'on remonte vers la surface (Bca_3 , Bca_2 , Bca_1). La croûte rubanée (Bca_1) du sommet de l'encroûtement est le siège d'une dissolution intense favorisée par la grande quantité de nitrates libérés dans le sol sus-jacent pendant la saison des pluies.

Les observations micromorphologiques et nanomorphologiques permettent de mieux comprendre les mécanismes de l'altération isovolume et l'évolution de la séquence carbonatée. L'altération isovolume apparaît liée à une fragilisation du calcaire primaire par dissolution de bordure des rhomboédres de calcite sans variation appréciable du volume initial et de la libération de smectite (1) qui joue le rôle de « lubrifiant », d'où la consistance pulvérulente du matériau au stade le plus avancé de son altération (Cca_1).

Les divers faciès de calcite observés permettent d'émettre des hypothèses sur l'évolution de la séquence carbonatée :

— la micrite et microsparite rhomboédriques primaires avec faciès de dissolution (Cca_2 , Cca_1) soulignent une zone de départ de carbonates avec variations faibles des conditions hydriques au cours de l'année;

— la micromicrite rhomboédrique néoformée dans des conditions de fluctuation lente du degré d'humidité dans l'encroûtement (Bca_3 , Bca_2) est l'indice d'une réorganisation du calcaire primaire en un calcaire secondaire de cristallisation plus fine;

— la calcite en aiguilles observée dans la microporosité de la croûte (Bca_1) et du sol sus-jacent (pseudomycélium) et la calcite en bâtonnets qui tapisse la microporosité et la partie externe des éléments de croûte en dissolution témoigne des phénomènes de dissolution intense dont la micromicrite

(1) La smectite se conserve dans les horizons encroûtés, mais dans les horizons B structural et A elle se dégrade fortement : il y a néosynthèse de Kaolinite désordonnée hydratée.

secondaire est le siège. Les alternances dessiccation-humectation au cours de la saison des pluies, période où la température reste élevée (été austral), favorise la multiplication des transferts phase précipitée-phase dissoute et réciproquement, avec formation de calcite en aiguilles; il s'y ajouterait pour la calcite en bâtonnets l'influence des composés humiques abondants au contact sol-croûte pendant la saison humide.

REMERCIEMENTS

— à Sra Adélaïde MUSSI SANTOS, Directeur du Département

Ol. de l'Institut de Géosciences de l'Université Fédérale de Bahia, BRÉSIL, pour l'aide apportée dans le cadre de la convention O.R.S.T.O.M./IGUFBA (BRÉSIL).

— à Madame C. JEHANNO, pour les déterminations par microsonde électronique au Centre des Faibles Radio-activités du C.N.R.S.-C.E.A. à Gif-sur-Yvette (FRANCE).

— à la Direction des Laboratoires de Recherches de la Société L'ORÉAL à Aulnay-sous-bois, qui nous a aimablement ouvert l'accès à son microscope électronique à balayage.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 28 juillet 1982.*

BIBLIOGRAPHIE

- BAL (L.), 1975. — Carbonate in soil. A theoretical consideration on, and proposal for its fabric analysis. *Neth. J. Agric. Sci.* : 23.
- BARRETO (F. R. S.), 1977. — Solos carbonatados derivados de calcário Bambuí na região de Iracê-Canarana (Bahia). Thèse de Mestrado UFBA (Brasil).
- BREWER (R.), 1972. — The basis of interpretation of soil micromorphological. *Geoderma* V. 8 : 81-94.
- CALLOT (G.), DUPUIS (M.), CHAMAYOU, 1978. — Variation du pH de la solution dans les matériaux calcaires en relation avec la cinétique de dissolution du carbonate de calcium et du gaz carbonique. Rôle de la dilution et de la perméabilité du sol. *Ann. Agron.* 29 (1) : 37-57.
- DURAND (J. H.), 1949. — Essai de nomenclature des croûtes Soc. Sc. Nat. Tunisie, *Tunis Bull.* 3-4 : 131-142.
- DURAND (R.), 1978. — La pédogenèse d'une rendzine encroûtée développée sur la craie à poches du cryoturbation en Champagne. Thèse du Doct. État. Un., Strasbourg (France).
- GILE (L. H.), PETERSON (F. F.) and GROSSMANN (R. B.), 1965 a. — The K horizon : a master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Sci.* Vol. 99, H 74-82.
- GILE (L. M.), PETERSON (F. F.) and GROSSMANN (R. B.), 1966. — Morphological and genetic séquence of carbonate accumulation in desert soils.
- GOUDIE (A.), 1971. — A regional bibliography of calcrete in Food, Fiber and the Arid Lands, W. G. Mc. Ginnies, B. J. Goldman and P. Paylore eds. Univ. Arizona Press Tucson : 421-437.
- GOUDIE (A.), 1973. — Duricrusts on Tropical and subtropical Landscapes-Clarendon Press, Oxford.
- INDA (H. A. V.) et BARBOSA (J. F.), 1978. — Mapa Geológico do Estado da Bahia 1/1000.000 Governo do Estado da Bahia, Secretaria das Minas e Energia, Salvador, Bahia, Brasil.
- KUBLER (B.), 1976. — Quelques réflexions sur la cristallinité et la stabilité des carbonates dans le milieu naturel. Lab. Min., Petrog. et Geoch. Un. Neuchâtel.
- NOU (E. A. V.), 1978. — A pedogenese sobre calcário Bambuí. Estudo de uma toposequência Cambisol, Cambisol vértico, Vertisol. Dinâmica dos carbonatos. Região de Iracê, Bahia, Brasil. Tese de Mestrado UFBA Salvador Bahia, Brasil.
- POUGET (M.) et RAMBAUD (D.), 1980. — Quelques types de cristallisation de calcite dans les sols à croûte calcaire (steppes algériennes). Apport de la microscopie électronique, in Carbonates, Un. Bordeaux III, S.Cr.F./A.G.S.O./S.F.M.C.
- REEVES (C. C. Jr.), 1976. — Caliche origin classification and uses, Estacado Books Lubbock, Texas, USA.
- RPMARIZ (D. A.), 1974. — Aspectos da Vegetação da Brasil I.B.G.E. Ministerio do Pinejamento, Brasil.
- RUELLAN (A.), NAHON (D.), PAQUET (H.) et MILLOT (G.), 1975. — Figures d'épigénie par la calcite dans les encroûtements calcaires. Congrès de Micromorphologie, Madrid.
- RUELLAN (A.), 1980. — L'accumulation calcaire dans les sols, in Carbonates, Un. Bordeaux III, SGF/AGSO/SFMC.
- SANTOS (S. M. L.), 1976. — Contribuição à caracterização, genese classificação de alguns solos derivados do calcário Bambuí na região de Iracê — Xique-Xique, Bahia, Brasil.
- SEGHAL (J. L.) and STOOPS (Cr.), 1972. — Pedogenetic calcite accumulation in arid and semi-arid regions of the Indogangetic alluvial plain of Erstwhile Punjab (India). Their morphology and origin. *Geoderma*, 8 : 59-72.
- SNLGS/EMBRAPA, 1977. — Levantamento exploratorio, Reconhecimento de solos da margem direita do Rio São Francisco, Estado da Bahia, Brasil. Recife, Peruambuco, Brasil.
- TRICART (J.) et SILVA (C. T.), 1968. — Estudos geomorfológicos na Bahia e Sergipe. Fundação para o Desenvolvimento da Ciência na Bahia.