ALTÉRATION DES ROCHES DURES CARBONATÉES SOUS LES CLIMATS HUMIDE ET SUBHUMIDE DU LIBAN

Sous un climat typiquement méditerranéen à forte pluviométrie (800 à 1500 mm) l'altération des roches dures carbonatées s'effectue suivant un mécanisme spécifique de ces roches: *l'altération pelliculaire*. Les caractéristiques de ses résidus argileux sont à l'origine des sols rouges et de quelques sols bruns méditerranéens.

I. DÉFINITIONS

Avant d'aborder les mécanismes de l'altération proprement dite, il nous paraît nécessaire de préciser la définition des termes suivants:

— *L'altération* est une dégradation soit de la structure, soit de la nature des constituants des roches sous l'actions d'agents extérieurs variés, (*alterare:* changer de). C'est un «changement de l'état normal des choses» (Larousse).

— *Roches carbonatées et décarbonatation* seront des termes utilisés de préférence à roches calcaires et décalcarification; décalcification est impropre quand il s'agit de dissolution des carbonates.

— *Sol:* toute formation superficielle meuble résultant de l'action d'agents variés extérieurs sur la lithosphère.

— *Terra rossa*, terme généralement employé pour désigner des sols rouges méditerranéens, mais il doit être réservé à des *formations* rouges, aclimaciques. Au Liban il faut être prudent quant à l'utilisation de ce terme, du fait qu'en régions humides il s'agit le plus souvent de mélanges d'argiles de décarbonatation anciennes et actuelles qui sont des sols rouges.

— *Argiles de décarbonatation:* produits silicatés constituant plus de 90% des éléments résiduels laissés par les dissolutions de roches carbonatées. Ces argiles, libérées en très petites quantités à la fois, sont très mobiles et s'intègrent rapidement au sol environnant.

Les facteurs de l'altération et les processus physiques, chimiques et biologiques de cette altération ont été trop souvent décrits dans les ouvrages pédologiques pour qu'il soit utile d'y revenir ici. L'accent doit être mis cependant sur le *facteur lithologique*.

L'hétérogénéité, la texture et la nature des matériaux mis en œuvre sont des facteurs essentiels de l'altération. L'hétérogénéité de la roche facilite les clasties, provoque des dissolutions préférentielles qui augmentent la porosité. Une calcite pure n'a qu'une microporosité intercristalline faible (0,1 à 1%): elle est difficilement altérable. Un calcaire fossilifère, par contre, présente souvent des vacuoles, de fins canalicules qui multiplient les voies d'accès aux solutions dissolvantes.

La texture grenue, granuleuse, saccharoïde ou oolithique influe considérablement sur les phénomènes d'altération. Les facilités d'attaque chimique varient en raison inverse du diamètre des grains. Les surfaces spécifiques sont, en effet, d'autant plus grandes que les rayons moyens des grains sont plus petits.

La nature enfin des carbonates intervient. L'aragonite est sensiblement plus soluble que la calcite. La dolomite est généralement moins soluble que la calcite, sauf aux fortes températures et à condition que la pression de CO_2 ne soit pas trop faible (1 atm. environ).

II. ALTÉRATION DES ROCHES DURES CARBONATÉES

1. Zones et niveaux d'altération

Trois zones d'altération seront distinguées:

— altération de surface.

— altération pédologique (à l'intérieur ou au contact du sol).

— altération souterraine.

a) *Les altérations de surface* (1)

L'érosion de surface marque profondément la morphologie des montagnes libanaises et prépare les altérations pédologiques.

— *Les altérations mécaniques*: beaucoup de roches carbonatées sont naturellement peu poreuses, mais extrêmement rigides elles se fissurent sous l'effet des chocs.

Les chocs dûs aux mouvements tectoniques, aux heurts de roches entre elles, aux enfoncements et mouvements divers des sols, provoquent des fissurations et élargissent les réseaux de diaclases favorables aux altérations chimiques ultérieures.

Les alternances de températures et le gel sont également de puissants agents du morcellement des roches surtout en altitude. Le vent semble avoir un effet beaucoup plus faible.

— *Les altérations chimiques* peuvent jouer même à la surface de la roche nue un rôle non négligeable au niveau des joints, fréquents dans les calcaires, des diaclases et fissures provoquées par les actions mécaniques. Il semble même qu'elles interviennent à la surface des roches non fissurées en formant des cupules, des excavations diverses, etc...

— *Les altérations biologiques* s'observent souvent dans les lieux humides (mousses, lichens); même en zone semi-aride des microlichens parviennent à vivre dans les fissures, à l'intérieur des roches. Elles ne jouent cependant pas un rôle important dans l'altération des roches carbonatées.

b) *Les altérations souterraines*, bien que considérables dans les formations karstiques, ne seront pas envisagées dans la présente note (2).

c) *Les altérations pédologiques:* ce sont les altérations qui se produisent à l'intérieur et au contact du sol par l'intermédiaire de ses solutions.

Les altérations de surface ont préparé les altérations pédologiques en fragmentant et conditionnant les roches qui constitueront la matière première de ces altérations.

Dans le sol, deux niveaux d'altération doivent être distingués:

— *un niveau superficiel* correspondant à l'horizon plus ou moins humifère des sols. C'est en général un niveau d'intense altération des roches et cailloux de surface, grâce aux dégagements importants de CO_2 dû aux décompositions de matières organiques et à la respiration des microorganismes, aux acides de la nitrification et des décompositions humiques.

Les pellicules calcaires d'altération observées en saison sèche sont beaucoup plus développées dans l'horizon humifère qu'en profondeur. L'analyse des extraits au 1/5 (tableau 1) montre les fortes proportions de sels solubles dans l'horizon de surface.

— *un niveau profond* correspondant aux horizons non ou peu humifères du profil. En profondeur les teneurs en CO_2 des eaux du sol diminuent, elles se chargent en sels dissous et deviennent moins agressives.

2. Milieux d'altération

L'altération sera fonction dans l'un et l'autre niveaux, du milieu considéré:

— *le milieu aéré alcalin*, — appelé par G. Millot: milieu lessivé alcalin — est un sol saturé où les solutions circulent librement et percolent en profondeur. C'est le cas de nombreux sols rouges méditerranéens bien structurés et parfaitement perméables.

La surface recevra des eaux peu chargées en sels et, grâce à une très bonne structure, elles lessiveront facilement les bicarbonates formées au cours des altérations.

Ce mouvement descendant des solutions du sol peut se poursuivre dans tout le profil tant qu'aucun obstacle ne s'oppose à leur libre circulation.

— *le milieu confiné basique* (G. Millot, 1964) est le sol, ou bien l'horizon du sol, où la circulation des solutions se trouve ralentie ou bloquée pour diverses raisons: poches sans exutoires, niveaux imperméables, etc...

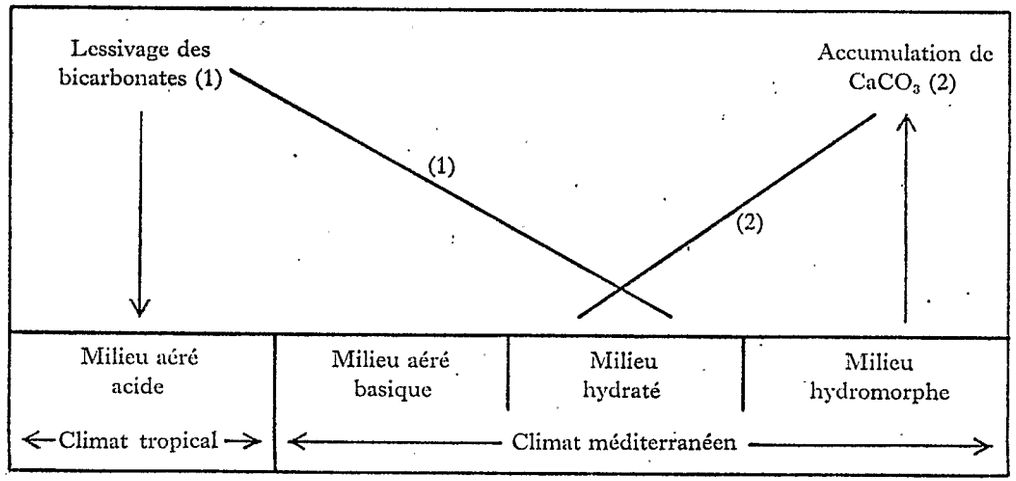
Une distinction sera faite entre:

— *le milieu confiné hydraté* où les solutions du sol sont simplement ralenties, avec cependant engorgement et accumulation partielle de $CaCO_3$ sous forme de nodules. C'est le cas des sols bruns méditerranéens (3).

— *le milieu confiné hydromorphe* où les solutions du sol sont bloquées à plus ou moins grande profondeur, avec souvent de très intenses accumulations calcaires.

En milieu confiné les solutions chargées en sels dissous perdent de leur agressivité. C'est un milieu où l'altération est très réduite. *L'altération pelliculaire* n'y a jamais été observée. Par contre, les précipitations de $CaCO_3$ sont fréquentes sous formes diffuses, de nodules ou d'encroûtements.

Schématiquement les mouvements des sels dissous, essentiellement des bicarbonates, peuvent être représentés par le diagramme suivant:



3. Mécanisme de l'altération

Le point de départ de cette altération est une hydratation des roches carbo-

natées par les fissures, pores et diaclases, suivie d'une dissolution sous forme de bicarbonates.

Elle est d'autant plus rapide que le milieu est plus riche en matières organiques et que les solutions circulent plus librement (porosité).

L'hydratation et les altérations varient suivant la nature des carbonates.

a) Elles peuvent être *ponctuelles et superficielles*, c'est le cas de certaines altérations de zones semi-arides: au niveau des fissures *(peaux d'éléphant)*, par points (surface en *pain d'épice*), etc...

b) Elles peuvent être *périphériques ou pelliculaires*, c'est-à-dire qu'elle n'intéresse chaque fois qu'une mince couche à la surface de la roche.

c) Elles peuvent être *profondes et progressives*. C'est le cas, assez rare cependant, où plusieurs stades d'altération peuvent être observés entre la roche saine et le produit d'altération.

d) Elles peuvent être *internes* et se produisent dans les fissures, les diaclases, les pores ou multiples cavités que certaines roches hétérogènes peuvent présenter.

Plusieurs types d'altération peuvent être observés simultanément allant jusqu'au «pourrissement» d'une grande partie de la roche.

L'altération périphérique ou pelliculaire sera le seul mécanisme étudié ici, car il semble être commun à de nombreux calcaires durs du versant Ouest du Liban et, somme toute, le plus important.

4. Altération pelliculaire des calcaires

Sous une pluviométrie supérieure à 400 mm, des sols argileux, non ou peu calcaires, au contact d'une roche dure carbonatée, se rétractent en périodes sèches en arrachant à la roche une mince pellicule de carbonates.

C'est le phénomène dit *d'altération pelliculaire.*

a) Observation du phénomène

En de très nombreux points du Liban (Rayak, Qaraoun, Bent Jbail, Nabatiyé, Jezzine, Qartaba, Hamat, etc...) ce phénomène, de plus ou moins grande intensité, a été observé aussi bien sur calcaires durs que sur dolomies, exceptionnellement sur calcaires tendres. Ces pellicules sont beaucoup plus importantes dans l'horizon organique qu'en profondeur et sont minimes ou inexistantes dans les milieux confinés hydratés ou hydromorphes. Des pellicules se forment même dans des déblais récents de carrière ou de routes, sur des terres récemment labourées. Elles ont enfin été obtenues au bout de 3 mois dans des pots de végétation.

b) Cycle de formation des pellicules

L'apparition et la disparition de ces pellicules semblent liées à la succession de périodes sèches et pluvieuses, d'où l'étude de l'évolution des sels solubles dans les profils au cours des saisons. Nos observations peuvent se résumer comme suit:

— en octobre, avant les pluies, les pellicules étaient parfaitement bien développées, des efflorescences calcaires apparaissaient même à la surface de certains profils desséchés.

— en décembre, après deux fortes périodes de pluie, les pellicules n'étaient plus apparentes mais l'analyse des sels solubles (tableau 1) a montré que les solutions du sol étaient chargées en bicarbonate de calcium.

— en février, après d'abondantes pluies, les sels solubles avaient considérablement diminué dans tout le profil.

Au cours de la petite période sèche du début mars de nouvelles pellicules s'individualisèrent.

L'analyse des extraits au 1/5 a été effectuée sur 8 profils du bassin du Nahr Beyrouth à deux moments différents. Le 17/12/65, après deux séries de fortes pluies et le 4/2/66, au milieu de la saison des pluies:

— lessivage intense des sels solubles (bicarbonates surtout) pendant la saison des pluies,

— teneurs très élevées en surface aussi bien dans les sols rouges que dans les sols bruns,

— augmentation des sels solubles en profondeur dans les sols bruns ou les poches brunes en début de saison des pluies, puis disparition par lessivage ou par précipitation.

c) Mécanisme de formation des pellicules

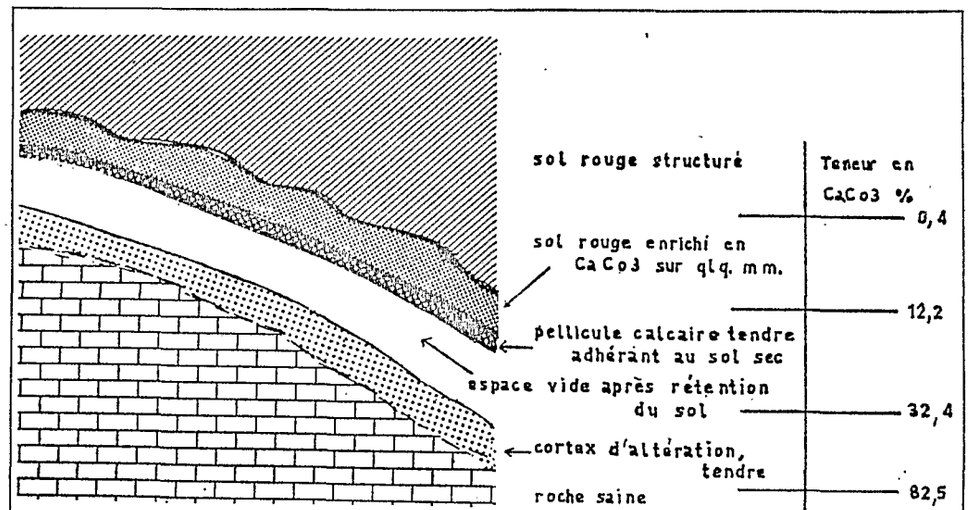


Fig. 1 – Altération pelliculaire d'un calcaire dur.

L'analyse des carbonates (par dosage du CO_2 en circuit fermé, Kehren 1965) met en évidence l'existence d'une *zone corticale* qui conditionne la formation de la pellicule calcaire. Le mécanisme de cette altération peut se décomposer en 4 phases principales.

(1) *Hydratation* sur quelques dizièmes de millimètres d'un cortex d'altération. Un début de dissolution se produit alors, avant qu'une partie de ce cortex ne soit arrachée par le sol.

(2) *Arrachement* d'une pellicule calcaire quand le sol se rétracte par dessiccation, ce qui peut se produire à la faveur d'une période sèche de 10 ou 15 jours en plein hiver.

(3) *Dissolution* plus ou moins complète de la pellicule par les eaux de pluies, sous forme de bicarbonates.

(4) *Entrainement et lessivage* de ces sels dans les eaux de ruissellement, en profondeur sur les parois des fissures, des cavernes ou dans un horizon d'accumulation du sol.

TABLEAU 1 — Sels solubles (Extraits au 1/5)

Echantillons	Type de sols	Profondeur en cm	Prélèvements du 17/12/65		Prélèvements du 4/2/66	
			Conductivité à 25°C/cm	Ca/mg/l	Conductivité à 25° C/cm	Ca/mg/l
248.1	Brun méditerranéen	0–15	775	147,0	182	38,0
248.2	,, ,,	30–50	720	125,0	129	23,2
248.3	,, ,,	80–100	161	30,4	117	20,3
248.4	,, ,,	160–180	–	38,7	125	19,4
298.1	Brun méditerranéen	0–15	312	73,0	306	70,0
298.2	,, ,,	25–35	127	25,2	117	20,3
298.3	,, ,,	50–70	124	22,7	121	22,4
298.4	,, ,,	90–120	262	49,0	119	13,9
151.1	Rouge méditerranéen	0–15	387	52,5	193	35,0
151.2	à poches brunes	20–30	310	50,3	145	25,2
151.3	,, ,,	50–60	178	35,6	148	29,0
151.4	,, ,,	90–100	393	54,7	122	23,7
225.1	Rouge méditerranéen	0–15	212	38,7	141	25,4
225.2	,, ,,	15–25	178	36,6	118	21,8
225.3	,, ,,	40–50	181	31,8	116	24,0
225.4	,, ,,	75–90	185	30,4	115	20,3
288.1	Rouge méditerranéen	0–15	202	29,0	91	23,2
288.2	,, ,,	30–50	–	–	108	–
288.3	,, ,,	60–80	214	32,4	118	19,7
287.1	Rouge méditerranéen	0–15	260	38,0	117	20,6
287.2	,, ,,	35–50	164	27,8	102	16,0
287.3	,, ,,	60–80	167	30,3	125	23,2
287.4	,, ,,	80–100	200	38,6	145	28,0

d) Importance de ces pellicules

De petites mottes portant des pellicules ont fait l'objet d'analyses de $CaCO_3$ (mesure du CO_2). Les résultats rapportés à la surface des pellicules permettent d'évaluer l'épaisseur de roche ainsi arrachée.

TABLEAU 2 — Importance des pellicules

Echantillons	Roche	Sols	Surface des pellicules (cm^2)	Quantité de $CaCo^3$ (mg)	Volume de $CaCo^3$ en mm^3 (d=2,5)	Epaisseur de roche arrachée (mm)
284.1	Calcaire dur Jurassique	Sol rouge	47,6	642	256	0,053
237	Calcaire dur (C^4)	Sol rouge	2,8	54	21,6	0,077
317	Calcaire dur (J)	Sol rouge	14	104,5	42,0	0,030
307	Calcaire dur (J)	Sol rouge	17	500	200	0,118
Nabatyé	Calcaire dur (C^4)	Sol rouge	17,8	1430	570	0,32
308	Calcaire dur	Sol châtain	29	294	118	0,04
215	Calcaire tendre	Sol brun	9,25	1110 (moins témoin)	584 (d=1,9)	0,63

Ces données, très variables, sont provisoires. Le n° 317 est un échantillon récemment prélevé, après 15 jours de petite saison sèche; il n'est pas impossible que les pluies de mars-avril aient fait disparaitre plus ou moins complètement cette pellicule et qu'elle se soit reformée au cours de la saison sèche suivante.

Ces valeurs donnent une bonne idée de l'intensité d'altération en un point, mais il serait illusoire de vouloir l'étendre à toute une région ou à une période de plusieurs milliers d'années.

Il s'agit là du processus physico-chimique essentiel de la formation des sols méditerranéens. Mais quels en sont les mécanismes intimes? Que deviennent les résidus non calcaires de la pellicule? Comment s'incorporent-ils aux solutions du sol et aux sols?

Sans répondre pour l'instant à ces questions, il parait utile de connaitre la nature et l'importance de ces résidus non calcaires.

III. LES RÉSIDUS NON-CALCAIRES DES ROCHES CARBONATÉES

Des échantillons de roches carbonatées ont été attaqués à HCl au 1/2 et les résidus d'attaque, filtrés et lavés, ont pu être étudiés. Des essais comparatifs avec solutions à pH = 4,5 (acide acétique 10% + acétate d'ammonium) ont montré que HC1 au 1/2 n'altérait pas ou très peu les couleurs.

1. Couleur

Aucune corrélation n'est constatée entre les couleurs des sols rouges (2,5 à 5 YR) et celles des résidus non calcaires (10 YR), bien que certains résidus soient déjà très rouges (5 à 7,5 YR). Il y a apparemment correspondance entre la couleur des résidus et celle des sols bruns méditerranéens. Corrélation également entre la couleur des résidus et celle des roches quand les carbonates ne la masquent pas trop.

Les éléments non calcaires des roches carbonatées sont généralement bruns (10 YR); la rubéfaction est donc un phénomène essentiellement pédologique.

2. Examen des résidus non calcaires

L'examen au binoculaire ne permet qu'une étude qualitative rapide. Le résidu, très faible ou abondant suivant le type de roche considéré, est formé d'une pâte apparemment amorphe, brune, enveloppant des éléments grossiers bien individualisés.

a) *La pâte brune*, formée d'éléments très fins, constitue la plus grande partie du résidu. Elle est brune, mate, parfois noire et brillante. Des déterminations de carbone organique ont donné des résultats positifs, dans le cas des échantillons brun-foncé.

Des analyses aux rayons X des résidus de quelques roches ont donné pour 3 échantillons une dominance d'illite, pour 2 échantillons une dominance de montmorillonite, présence de kaolinite et de quartz et pour un d'entre eux (calcaire tendre éocène) présence exclusive de montmorillonite.

D. H. Yaalon (1955) Grim, Lamar et Bradley, G. Millot (1949) (6) ont généralement trouvé dans la plupart des échantillons une dominance d'illite, la kaolinite et la montmorillonite étant souvent présentes, parfois dominantes.

L'illite et la kaolinite des sols formés sur roches carbonatées sont donc en grande partie héritées de ces roches-mères. La montmorillonite, partiellement héritée, serait le résultat de transformation, de diagenèse ou de néo-synthèse (7).

b) *Les éléments grossiers*, bien individualisés, sont très variés. *La silice* constitue l'élément essentiel de ces débris grossiers:

— des petits *quartz*, hyalins et arrondis, sont nettement visibles dans la masse pâteuse. Ils se retrouvent identiques dans les sables des sols,
— *des éléments siliceux* opaques, à angles vifs, sont également fréquents,
— *des oxydes métalliques*, sous forme d'éléments plus ou moins arrondis, bruns ou noirs, font fortement effervescence à l'eau oxygénée,
— divers fragments, plus ou moins silicifiés, semblent être des débris de tests ou de matières organiques.

3. Evaluation quantitative des résidus

Il est préférable de faire appel à l'analyse minéralogique des carbonates pour connaître l'importance des résidus.

TABLEAU 3 — Résidus non-calcaires (%) de la roche séchée à 105°C.

Calcaires	Calcaires tendres	Calcaires durs		
		aptiens	cénomaniens	jurassiques
Résidus %	5,41 10,80 6,27	4,14 5,00 6,14 9,13	3,04 (dol) 4,70 (dol) 2,91 1,41	3,17 2,43 1,39 (dol) 5,63
Moyennes	7,52	6,10	3,01	3,15

Bien qu'il ne s'agisse que d'une quinzaine d'analyses, elles reflètent assez bien la réalité et nous donnent une idée de la masse de roche carbonatée nécessaire à la formation d'un sol. Ainsi pour former un sol rouge méditerranéen de 20 à 30 cm., ce qui représente la moyenne, estimée, de sol recouvrant uniformément les calcaires durs de la région, il faut (avec d = 1,3 pour le sol, d = 2,6 pour le calcaire, et complexe hérité = 75% du sol) qu'une couche de roche carbonatée soit altérée sur:

— 2,7 à 4 mètres pour les calcaires durs cénomaniens et jurassiques
— 1,3 à 2 mètres pour les calcaires durs de l'Aptien et pour les calcaires tendres (d = 1,9).

Connaissant la valeur de l'altération annuelle, soit par la dureté des eaux, soit par l'importance de l'altération pelliculaire, il parait possible de dater tel ou tel sol. En fait ce raisonnement n'est valable qu'en apparence (nous y reviendrons par ailleurs).

4. Matières organiques des résidus

Les imprégnations noires ou brunes des résidus de certains échantillons font penser à la formation de complexes humus-fer. L'analyse du carbone organique (méthode Anne) donne pour ces échantillons des résultats qui ne sont pas négligeables.

TABLEAU 4 — Matière organique des résidus non carbonatés (mg.%)

Calcaires tendres	Calcaires durs			
	jurassiques	aptiens	éocènes	cénomaniens
25	38	25	25	21
72	20	3,4	71	7
23	34	56	3	26
	18	9		
	34			

Ces quantités représentent 1 à 3% des résidus et influencent nettement la coloration de la roche elle-même. Il est probable qu'une partie de ces matières organiques, du moins pour les échantillons de surface, a pénétré par les fentes, clivages et pores divers, avec les solutions du sol.

Il apparaît que le complexe argileux associé au complexe détritique (6) est pour une grande part hérité de la roche-mère dont les carbonates sont lentement dissous. Par conséquent, il n'est peut-être pas nécessaire de faire appel à des mécanismes physico-chimiques très compliqués (7) (8) pour expliquer la formation de ces sols.

IV. CONCLUSION

L'agressivité des climats humides du Liban se manifeste par une altération des roches carbonatées dures, facilement observable sur le terrain. Les pellicules d'altération, le pourissement d'un cortex d'altération, la charge en bicarbonates

des solutions du sol et des eaux de drainage sont autant d'éléments qui mettent en évidence les processus de libération des résidus non carbonatées des calcaires et dolomies. Ces résidus sont des silicates, des hydroxydes, du quartz, des produits amorphes, etc...

Ce sont, ni plus ni moins, les constituants d'un sol qui continue à se former sous nos yeux.

Ces résidus sont certes peu importants; le processus est lui-même très lent; mais les très faibles quantités libérées en s'incorporant à une masse déjà structurée et aérée, trouvent le milieu idéal pour s'oxyder et se rubéfier relativement vite.

Le milieu est d'autant plus favorable que les quantités intervenant sont faibles et que l'humidité n'est pas excessive. Sous de très fortes pluviométries, la végétation se développe, les altérations s'intensifient considérablement, mais le milieu risque d'être moins favorable à la rubéfaction, à moins de changements importants de températures: alors climat et pédogénèse cessent d'être proprement méditerranéens.

Maurice LAMOUROUX (9)

NOTES

(1) Résultat des actions purement météoriques (NDLR).
(2) S. KARKABI.
(3) LAMOUROUX (M) et AUBERT (G).
(4) LAMOUROUX (M) — *Observations sur l'altération des roches calcaire sous climat méditerranéen humide (Liban)*. Cahiers ORSTOM — Pédologie — Vol. III N° 1 — 1965.
(5) Analyses exécutées par les laboratoires de géologie du Professeur G. MILLOT (Strasbourg).
(6) MARCELIN (P) — *Terres et sols rouges des régions calcaires du Gard et du Vaucluse*— Bulletin Soc. Etude Sc. Nat. du Vaucluse. (1941) — Avignon.
(7) REIFENBERG (A) — *The soils of Palestine* — 2ème éd. (1947) Thomas Murby and Co — London.
(8) BORDAS (F) — *Contribution à l'étude des facteurs de la production agricole du Bas-Rhône* (1950) — Thèse — Imp. Rullière — Avignon.
(9) Directeur de Recherches ORSTOM, Expert de la Coopération Technique, détaché à l'Institut de Recherches Agronomiques de Tell Amara.

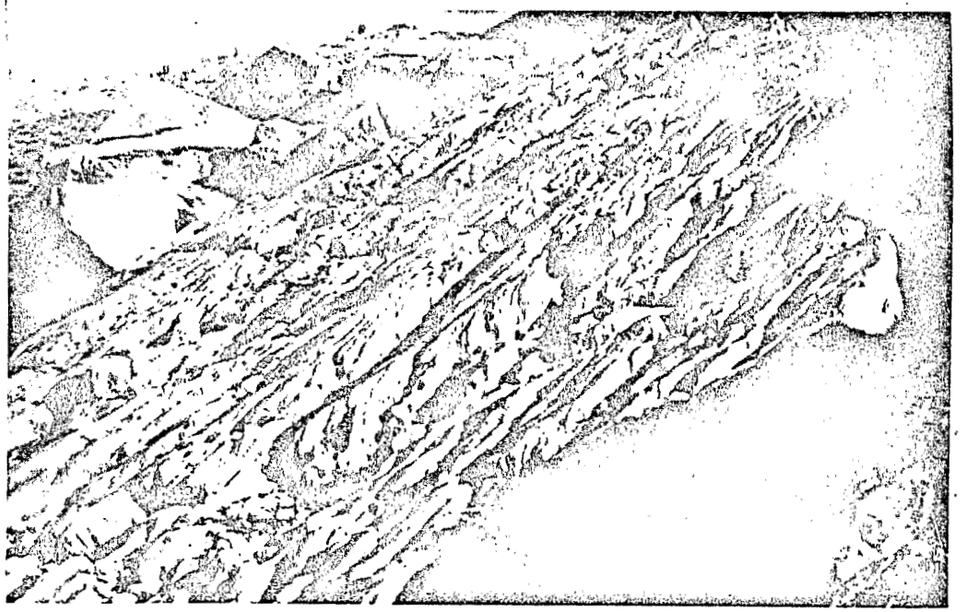


Photo 1. *Col de Jezzine à Machghara. Surface striée ou guillochée due au ruissellement des eaux (calcaire dur jurassique)*
(cliché M. Lamouroux)

Photo 2. *Bekaata — Calcaires dolomitiques sculptés par les eaux de pluie.*
(cliché M. Lamouroux)

Photo 3. *Altération «en forme de molaire» à l'intérieur du sol, suivant le processus pelliculaire.*
(cliché M. Lamouroux)

Photo 4. *Non loin de Qartaba — Formation d'arènes sableuses et altération en boules de dolomies grises.*
(cliché M. Lamouroux)

T4

HANNON

REVUE LIBANAISE DE GÉOGRAPHIE

ALTÉRATION DES ROCHES DURES CARBONATÉES

MAURICE LAMOUROUX

2 8 AVR. 1976
O.R.S.T.O.M.
Collection de Référence
n° B 8901 Pedo

I.B. 67-1

EXTRAIT DU VOLUME II — 1967