

# CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA PEDOGENESE EN SOLS ROUGES MEDITERRANEENS

M. LAMOUREUX

Mission ORSTOM RAYAK LIBAN

## SOMMAIRE

*Sous un climat méditerranéen humide les altérations des roches dures carbonatées sont mises en évidence par un processus physico-chimique, appelé « altération pelliculaire ».*

*Dans les sols rouges méditerranéens, constitués essentiellement par les résidus de décarbonatation des roches, la silice est modérément entraînée par les eaux de drainage, mais, les hydroxydes ne le sont pas ou très peu.*

*Dans les poches karstiques, les sols rouges subissent des remaniements limités à la poche elle-même ou aux poches voisines.*

*Dans la régions non karstiques les sols peuvent être transportés par le vent ou les eaux et les sols rouges remaniés, qui résultent de ces transports sont sans rapport avec le substratum.*

*Sous le climat humide et subhumide du Liban, les sols rouges méditerranéens sont incontestablement des sols actuels.*

*Une climatologie de formation de ces sols est définie et caractérisée par les paramètres suivants :*

- $T^{\circ}$  moy. annuelle : 10 à 22° C.
- $P$  moy. annuelle — 600 mm — 1400 mm.
- $D$  ( $P - ETP$ ) — 200 à 1000 mm.
- $E_1 = D \times T$  supérieur à 5000.

*Le sol rouge méditerranéen apparaît comme un sol décarbonaté, non ou peu désaturé et dont l'hydrolyse des silicates est modérée. Ce sol doit son existence à une saison nettement pluvieuse (plus de 600 mm) fraîche et à une saison chaude sèche (pédoclimat sec d'au moins 4 mois).*

I. — INTRODUCTION.

II. — MILIEU MATERIEL.

III. — ALTERATIONS DANS LES SOLS DES ROCHES DURES CARBONATEES.

1 — Milieux.

2 — Nature des constituants de ces milieux.

3 — Nature des roches carbonatées.

4 — Formes d'altération.

5 — Altération pelliculaire.

6 — Evolution des principaux éléments au cours des altérations.

7 — Résidus d'altération et sols formés.

IV. — LES SOLS FORMES SUR ROCHES DURES CARBONATEES.

1 — Les sols rouges du karst.

1.1 — Description d'un profil.

1.2 — Dynamique d'un tel profil.

2 — Les sols rouges formés en régions non karstiques.

2.1 — Description d'un profil.

2.2 — Dynamique de la pédogénèse en milieu non karstique.

V. — FORMATION ACTUELLE, AU LIBAN, DE SOLS ROUGES MEDITERRANEENS ET AIRE CLIMATIQUE DE CETTE PEDOGENESE.

1 — Formation actuelle de sols rouges.

2 — Pédoclimats et aire climatique de formation des sols rouges méditerranéens.

2.1 — Zones pédoclimatiques.

2.2 — Secteurs pédoclimatiques.

2.3 — Aire climatique de formation des sols rouges.

2.4 — Pédogénèse et secteurs pédoclimatiques.

VI. — CONCLUSION.

VII. — BIBLIOGRAPHIE.

## I. — INTRODUCTION.

Les sols rouges méditerranéens, souvent appelés Terra Rossa avec des sens différents suivant les auteurs, ont fait l'objet de nombreuses études plus ou moins complètes. Pourtant il semble que très peu d'études aient été entreprises dans les régions méditerranéennes humides. En effet, beaucoup d'auteurs considèrent ces sols comme fossiles et n'évoquant plus sous le climat méditerranéen « conservateur ».

Cette note a pour but de montrer l'évolution actuelle de différents processus pédogénétiques aboutissant à la formation de sols rouges sous le climat humide et subhumide du Liban.

## II. — MILIEU NATUREL.

Le milieu libanais présente un certain nombre de particularités très marquées :

Deux chaînes montagneuses, s'élevant à 2 et 3000 mètres font obstacle aux vents dominants et provoquent sur le versant Ouest des précipitations hivernales variant de 700 mm sur la côte à 1500 mm en haute montagne.

Entre ces deux chaînes une longue plaine, la Bekaa, humide dans le Sud et semi-aride dans le Nord, prolonge le fossé de la mer Morte.

Les températures moyennes de 20 à 21° C sur la côte descendent à 10° C à 1800 mètres et 5° C à 2700 mètres.

La végétation naturelle est une forêt taillis de chênes jusqu'à 2000 mètres, très dégradée par le bétail. En haute montagne le tapis herbacé est pauvre et souvent de caractère steppique. La plaine de la Bekaa est cultivée depuis très longtemps, seules les zones conglomératiques restent nues ou parsemées de maigres graminées.

C'est à la lithologie, essentiellement calcaire, que les sols du Liban doivent leur originalité.

Ce sont des massifs karstiques tantôt très faillés et profondément déchiquetés, tantôt des karsts moins ruiniformes, plus ouverts, tantôt des strates calcaires avec intercalation de marnes.

Notons enfin quelques formations non calcaires, les grès du crétacé et des venues basaltiques très localisées.

Chacune de ces formations lithologiques présente un modelé en régime hydrographique, un type d'érosion et une pédogénèse particulière.

Cette note s'attachera essentiellement à décrire les processus pédogénétiques propres aux sols rouges formés sur roches dures carbonatées karstiques ou non.

## III. — ALTERATIONS DANS LES SOLS DES ROCHES DURES CARBONATEES.

Il a été montré dans une note précédente (Lamouroux 1965) que la nature des roches carbonatées a une influence considérable sur les sols qui résultent de leur altération.

Seules les roches dures carbonatées semblent donner naissance aux sols rouges ou bruns méditerranéens. Un processus d'altération de ces roches dures a été présenté à la Conférence de Madrid (LAMOUREUX, 1966), il est repris dans ce chapitre et complété.

### 1. MILIEUX.

La notion de milieu est souvent évoquée quand il est fait allusion au pédoclimat, au microrelief ou aux conditions de formation de tel ou tel type de sols. Il paraît de la plus haute importance en matière d'altération et plus généralement en pédogénèse, de mettre l'accent sur la nature du milieu, qui résulte de l'action de presque tous les facteurs pédogénétiques. Le milieu va conditionner l'intensité et le mode d'altération des roches :

*En milieu aéré, alcalin*, les solutions du sol circulent librement, se renouvellent et sont très agressives. C'est le cas des sols rouges méditerranéens qui drainent parfaitement bien, du fait probablement de leur bon état structural. Les roches carbonatées et les cailloux présents dans ce milieu subissent des dissolutions proportionnelles aux quantités d'eau de percolation, aux acides organiques, à leur nature, etc... Deux milieux aérés seront distingués en fonction du pédoclimat :

- *un milieu aéré, humide*, sous climat généralement pluvieux,
- *un milieu aéré, sec*, sous climat sec (moins de 400 mm),  
mais pas nécessairement, comme il est mentionné plus loin.

*En milieu confiné, hydraté*, caractérisé par un ralentissement de la lixiviation des bicarbonates, l'altération se produit en surface, dans l'horizon humifère, puis diminue d'intensité et cède enfin la place, en profondeur, aux accumulations. C'est le cas des sols bruns méditerranéens (LAMOUREUX, 1966).

*En milieu confiné, hydromorphe*, les phénomènes précédents sont accrus du fait du mauvais drainage des solutions du sol.

Les accumulations sont très fortes, alors que les altérations sont d'autant plus faibles que l'hydromorphie est plus intense dans le profil. Des phénomènes de réduction peuvent apparaître, ce qui n'est pas le cas en milieu hydraté.

### 2. NATURE DES CONSTITUANTS DE CES MILIEUX.

Un des mécanismes favorisant les altérations physico-chimiques des calcaires est l'alternance des dessiccations et des humectations de la masse argileuse où baignent les cailloux et les roches calcaires. Plus cette masse sera montmorillonitique, plus elle se rétractera ou se gonflera et plus le phénomène d'arrachement (étudié plus loin) sera important. La nature des argiles, leurs dimensions et la structuration du sol joueront un rôle dans la finesse du grain du matériau appliqué contre les surfaces calcaires à altérer et partant sur la continuité et l'épaisseur de la pellicule arrachée.

Il a été montré dans une note sur les argiles des sols du Liban (M. LAMOUREUX, H. PAQUET et G. MILLOT, 1967) que la montmorillonite était très abondante dans tous les sols rouges du versant Ouest.

### 3. NATURE DES ROCHES CARBONATÉES.

Les altérations sont conditionnées en grande partie par la nature lithologique des roches carbonatées. Seuls quelques points seront relevés ici, car les ouvrages scientifiques développent longuement ces questions.

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 intercrystalline 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 colithique influe considérablement sur les phénomènes d'altération. Les attaques chimiques 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, sauf aux fortes températures et à condition que la pression de  $\text{CO}_2$  ne soit pas trop faible (1 atmosphère environ).

### 4. LES FORMES D'ALTÉRATION.

Les formes d'altération varient à l'infini suivant le climat, le milieu, les calcaires, etc... Quatre groupes seulement seront distingués :

4.1. *Des altérations ponctuelles* se produisant généralement en milieu aéré, sec. Les pluies sont faibles, l'évaporation est forte et l'eau ne subsiste que dans les fissures ou les creux. Les dissolutions vont se limiter à des microzones et donnent à la surface des roches des aspects caractéristiques, altérations « en peau de tortue », « en mie de pain », etc...

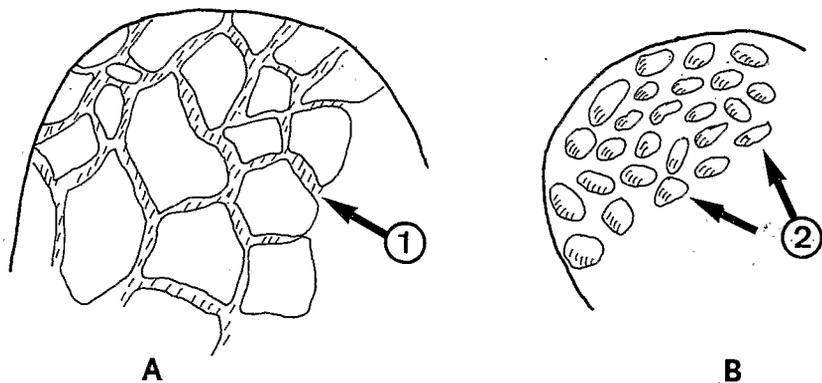


Fig. 1. — Altération en « peau de tortue » (A) ;  
en « mie de pain » (B).

- 1) Rainure de dissolution suivant une fissure.
- 2) Alvéoles de dissolution.

Corrélativement, les phénomènes d'entraînement des éléments dissous suivent une histoire particulière, hors de propos ici. Il y a lieu, par contre, de revenir sur la notion de milieu. Ainsi ces phénomènes d'altération ponctuelle se produisent généralement sous des pluviométries voisines de 400 mm, pourtant ils ont été observés à 3 000 m d'altitude où les pluies dépassent 1 mètre. Les précipitations se font en montagne sous forme de neige et les crêtes ou plateaux balayés par les vents sont très secs, le pédoclimat y est de type semi-aride, observation également faite par l'écologiste PABOT (1959). Ceci expliquerait une pédogénèse de type semi-aride, localisée à des microzones, voisines de zones d'intense altération.

4.2. *Des altérations internes* se produisant dans des diaclases, les fissures, les multiples cavités de la roche. Ainsi un calcaire bleu, relativement poreux, ne conserve intact qu'un noyau, alors que le pourtour, sur plusieurs décimètres, est déjà altéré (de couleur ocre-jaune et a perdu environ 6 % de ses carbonates).

4.3. *Des altérations progressives*, du type de celles observées habituellement sur roches non carbonatées. Cette altération, décrite antérieurement (LAMOUREUX, 1965) suivant cinq stades allant de la roche saine au sol, est assez rare sur calcaires durs, mais fréquente sur calcaires tendres. Elle est facilitée par un pédoclimat très humide, des calcaires grossièrement cristallisés et riches en éléments non carbonatés, donc rapidement altérés.

4.4. *Des altérations périphériques ou pelliculaires* n'intéressant qu'une mince épaisseur de la roche, allant de quelques millimètres à des épaisseurs inappréciables. Ce type d'altération est le mécanisme le plus généralement observé sous les climats humides et subhumides du Liban.

## 5. L'ALTÉRATION PELLICULAIRE.

5.1. *Définition.* En milieu aéré, humide, les sols argileux non ou peu calcaires et riches en montmorillonite se rétractent quand ils sèchent, en arrachant une mince pellicule de la surface des roches carbonatées qui se trouvent à leur contact.

5.2. *Observations.* Ce phénomène a été observé en de multiples points du Liban et de Syrie, au Maroc, en Espagne et même en France. Les pellicules peuvent se former dans des déblais récents, dans des terres labourées. Elles ont été reproduites expérimentalement, en quelques mois, dans des pots de végétation et en tubes.

5.3. *Cycle de formation des pellicules.* Ces pellicules présentes dans les sols secs, à la fin de l'été, disparaissent en décembre après les premières fortes pluies. L'étude des bicarbonates dans les solutions du sol (Tableau I) permet de suivre, au cours de l'année, l'entraînement des pellicules calcaires arrachées par le sol.

Ces solutions sont 1,5 à 5 fois plus chargées en bicarbonates au début des pluies.

5.4. *Mécanisme de formation des pellicules* (déduit d'observations et d'analyses d'éléments totaux).

1<sup>er</sup> *stade* : Conditionnement d'un cortex d'altération, sur quelques dixièmes de mm, avec début de dissolution (2 à 20 % du CO<sub>3</sub>Ca).

2<sup>o</sup> *stade* : Arrachement d'une pellicule calcaire quand le sol se rétracte en périodes sèches.

3<sup>o</sup> *stade* : Dissolution plus ou moins complète de la pellicule par les eaux de pluies chargées en CO<sub>2</sub>.

4<sup>o</sup> *stade* : Entraînement et lessivage des bicarbonates par les eaux de ruissellement dans les fissures, les cavernes des karsts ou, tout simplement, accumulation en profondeur dans le profil, ce qui est le cas en milieux confinés.

TABLEAU I

*Solutions du sol (extraits au 1/5)*

Echant.	Type de sols	Prof.	Prélèvements du 17/12/65		Prélèvements du 4/2/66	
			Cté à 25°C	Camg/l	Cté à 25°C.	Camg/:
248.1	Brun médit.	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	(145)	38,7	125	19,4
298.1	Brun médit.	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 médit.	0-15	387	52,5	193	35,
152.2	à poches	20-30	310	50,3	145	25,2
151.3	brunes	50-60	178	35,6	148	29,0
151.4	" "	90-100	393	54,7	122	23,7
225.1	Rouge médit.	0-15	212	38,7	141	25,4
225.2	" "	15-25	178	36,6	118	21,8
225.3	" "	40-50	181	31,6	116	24,0
225.4	" "	75-90	185	30,4	114	20,3
288.1	Rouge médit.	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	" "	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

5.5. *Etude au binoculaire.* L'observation d'une pellicule formée en trois mois dans un vase de végétation montre que la surface appliquée à la roche calcaire n'est pas absolument continue, du moins quand il s'agit de terre peu tassée. En séchant, le sol argileux absorbe de l'humidité de la roche et entraîne des amas de cristaux de calcite qui adhèrent fortement aux éléments argileux du sol.

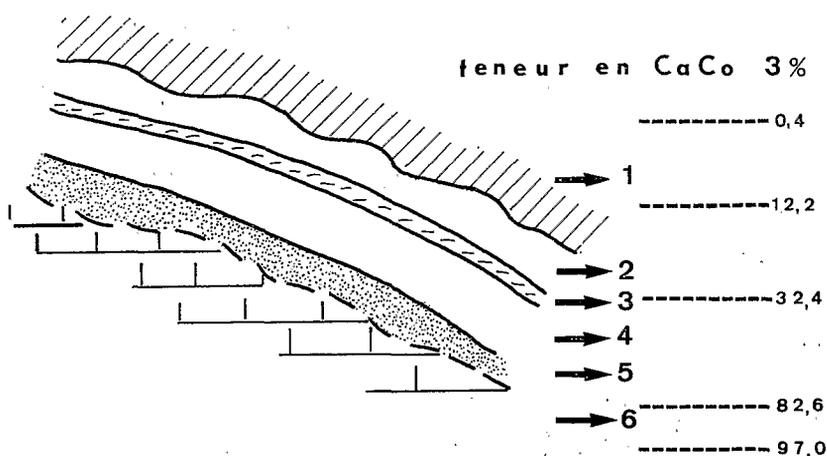


Fig. 2. — Altération pelliculaire d'un calcaire dur.

- 1) Sol rouge structuré.
- 2) Sol rouge enrichi en  $\text{CO}_2$  sur quelques mm.
- 3) Pellicule calcaire, tendre, adhérant au sol sec.
- 4) Espace vide après rétraction du sol.
- 5) Cortex d'altération tendre.
- 6) Roche saine.

Quand il s'agit d'un sol très argileux, peu structuré, la pellicule peut être continue et formée de plusieurs couches d'une poudre blanche, constituée d'amas de cristaux de calcite disjoints, collant au sol. Il est curieux de constater que la surface de contact présentée par le sol argileux est le plus souvent formée d'une mince couche dont les éléments argileux semblent orientés parallèlement à la surface de la roche (« stresscutan » probablement), tandis que la structure sous-jacente est polyédrique. Lors de « l'arrachement », une partie de cette couche orientée reste souvent collée à la roche.

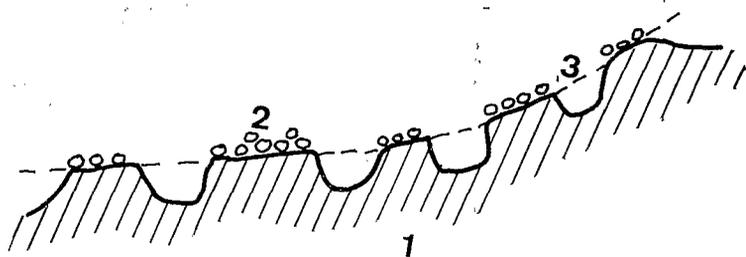


Fig. 3. — Surface d'une pellicule discontinue (grossière).

- 1) Sol bien structuré.
- 2) Grains de calcite formant la pellicule.
- 3) Surface alvéolaire de la roche.

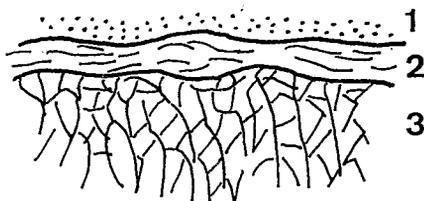


Fig. 4. — Couche orientée au contact de la roche calcaire.

- 1) Pellicule calcaire.
- 2) Couche orientée.
- 3) Sol rouge à structure polyédrique.

5.6. *Importance des pellicules* (Tableau II). Le dosage du  $\text{CO}_2$  et la mesure des surfaces de petites plaques pelliculaires a permis d'évaluer l'épaisseur de calcaire ainsi arrachée périodiquement à la roche. Ces valeurs varient considérablement suivant le pédoclimat, la roche, le sol, etc... ; elles oscillent entre 1/2 et quelques centièmes de mm.

TABLEAU II

*Importance des pellicules (P)*

Echant.	Roche	Sol	Surface de pellicules $\text{cm}^2$	Quantité de $\text{CoCo}_3$ mg	Volume de $\text{CaCo}_3 d=2,5$ $\text{m}^3$	Épaisseur de roches arrachées $\text{m/m}$ .
264.1	Calc. dur Jurassique	S. rouge	47,6	642	256	0,053
Gèdres Barpouk	Calc. dur (J)	S. rouge	84	406	162	0,020
237	Calc. dur (C.4)	S. rouge	2,8	54	21,6	0,077
234	Calc. dur (C.4)	S. rouge	20	109,6	44,0	0,022
317	Calc. dur (J)	S. rouge	14	104,5	42,0	0,030
307	Calc. dur (J)	S. rouge	17	500	200	0,118
Nabatyé P1	Calc. dur C.4	S. rouge	17,8	1430	570	0,30
P2	"	"	13,6	880	350	0,25
308	Calc. dur	S. châtain	29	294	118	0,04
215	Calc. tendre	S. brun	9,25	1110 (moins témoin)	584 ( $d=1,9$ )	0,63

## 6. EVOLUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS AU COURS DES ALTÉRATIONS.

Un certain nombre d'analyses de roches saines et de leur cortex plus ou moins altéré, donnent une idée des migrations préférentielles, dans ce milieu saturé, mais il est très difficile d'en interpréter les résultats.

6.1. *Dissolution des carbonates.* Ce travail lent des eaux de pluie est continu, assez faible quand les eaux ne font que ruisseler sur les roches ou cailloux, plus intense quand elles imprègnent le milieu et pénètrent dans le cortex d'altération.

En fait, au cours du premier stade de « conditionnement du cortex d'altération pelliculaire », une faible partie des carbonates est dissoute (2 à 20 %). Cela suffit pour désagréger l'édifice cristallin qui perd sa cohésion et se laisse facilement séparer de la roche saine.

6.2. *Silice, fer et alumine.* Il est encore beaucoup plus difficile d'interpréter les données relatives à ces trois éléments, du fait de leur très faible quantité dans les roches, de leurs variations encore plus faibles atteignant les erreurs analytiques, de l'hétérogénéité des matériaux souvent considérable, enfin des apports possibles des solutions du sol dans le cortex d'altération.

Compte tenu de ces remarques, les résultats globaux obtenus montrent :

- une augmentation relative constante du fer dans les résidus non carbonatés ;
- des variations, dans un sens ou dans l'autre, pour Si O<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, difficiles à interpréter.

L'examen des rapports moléculaires Si O<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si O<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aboutit à l'interprétation schématisée sur le Tableau III.

Les échantillons ont été placés, dans ce tableau, dans l'ordre croissant des rapports Si O<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la roche. Il est important de noter que, jusqu'à la valeur 3,5 du rapport, la silice est l'élément le moins entraîné ; le fer le serait faiblement tandis que l'alumine le serait assez fortement dans certains cas. Dès la valeur 4,2 de ce rapport, tandis que le fer et parfois l'alumine semblent très peu entraînés, la silice le serait nettement. Il paraît donc logique de considérer que l'état de la silice et de l'alumine, dans les résidus non carbonatés des roches calcaires, joue un rôle prépondérant dans l'entraînement relatif de ces éléments. La silice et l'alumine bien engagées dans les réseaux argileux seraient peu attaquées, alors que les formes cristallines et surtout amorphes, si elles existent, peuvent être entraînées.

Les courbes théoriques de dissolution de ces éléments en fonction du pH sont plus ou moins compatibles avec des données s'il s'agit de dissolutions. D'ailleurs la présence de cations divers peut apporter de profondes modifications dans les dissolutions de Si O<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Mais un phénomène à prendre en considération dans l'entraînement des éléments est probablement la formation de complexes colloïdaux.

En effet, des analyses d'eaux d'une part, de stalactites et stalagmites d'autre part, mettent en évidence quelques points importants :

TABLEAU III

Entraînement relatif de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  
dans les altérations de roches calcaires

Echantillons	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Interprétations		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
283 Cong. sain	0,5	2,5	5,0			
" altéré	4,8	6,2	1,3	Reste	Ent. forte	Ent. moy.
308 R.	0,7	4,3	6,1			
A.	1,4	9,1	6,5	Reste	Ent. faible	Ent. faible
237 R.	0,8	7,2	9,0			
Croûte fer.	1,5	6,3	4,2			
A.	2,6	9,4	3,6	Reste	Ent. moy.	Ent. faible
65 : R.	0,9	7,3	8,1			
A.	5,4	12,1	2,2	Reste	Ent. forte	Ent. faible
327 R.	2,6	11,6	4,4			
A.	7,2	14,3	2,0	Reste	Ent. moyen	Ent. faible
343 R.	3,5	5,6	1,6			
A.	4,3	18,1	4,2	Reste	Ent. faible	Ent. faible
183: Galet sain	4,2	Très élevé	Très élevé			
altéré	2,7	4,8	1,8	Ent.	Ent.	Reste
215 : R.	7,1	24,6	3,4			
Alt. terre	5,9 3,7	18,5 13,0	3,1 3,5	Ent. moy.	restent	
254 : R.	9,0	9,4	1,0			
A.	3,6	4,6	1,3	Ent. moy.	restent	
Zn.1 : R.	13,6	31,6	2,3			
2 Al	6,2	23,6	3,8			
3 A2	5,0	21,0	4,2			
4 A3	1,3	10,0	7,7	Ent. moy.	Reste	Ent. faible
118 : R.	12,9	Très élevé	Très élevé			
terre	2,9	7,2	2,5	Ent.	Ent.	Reste
336 : R.	540	410	0,7			
Croûte ext.	90	24,5	0,2	Ent.	Ent. faib.	Reste

R = roche

A = altération

Les interprétations sont des appréciations relatives par rapport à l'élément le moins entraîné, d'où le terme « Reste » correspondant à cet élément. « Ent. » signifie que l'élément a été relativement entraîné, faiblement, moyennement, ou fortement.

— Des eaux de rivières, laissées au repos pendant 3 mois, donnent à l'analyse des taux de SiO<sub>2</sub> variant de 2 à 6 mg/1, mais aucunes traces de fer et d'alumine.

— Des eaux des mêmes rivières, apparemment claires, analysées peu après les prélèvements, et des extraits de sols à pF 4,2, donnent des taux de silice sensiblement identiques, des traces nettes de fer et des taux d'alumine variant de 0,1 à 0,4 mg/1.

— Sur 7 stalagmites ou stalactites de la Grotte de Jeita, relativement fraîches et en activité (tube central), une seule contient un peu de fer

et des traces d'alumine. Les 6 autres échantillons ne contiennent aucunes traces de fer et d'alumine. La SiO<sub>2</sub> varie de 0,1 à 1 %. Il est à noter qu'une vieille stalagmite (Grotte aux Chauves-souris) a donné plus de 60 % d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

L'entraînement par dissolution des alcalins et alcalino-terreux commence dans les fissures et dans les zones corticales des roches ; il se poursuit dans les sols et dans les eaux. La silice, élément résiduel des dissolutions de roches carbonatées ou résultats d'éventuelles dégradations de minéraux silicatés, se retrouve en petite quantité dans les solutions du sol et dans les eaux de drainage. Le fer libéré de la masse calcaire des roches n'est que très faiblement entraîné et contribue à former une partie importante des éléments fins des sols.

L'alumine rentre généralement dans la constitution des silicates ; d'autres formes plus accessibles peuvent exister dans les roches et les sols, mais il ne semble pas que l'alumine soit facilement entraînée, du moins à l'état dissous, dans les eaux de drainage. Par contre, à l'état colloïdal, sous forme de complexes, ces éléments semblent être entraînés par les eaux, mais toujours en très faibles quantités.

#### 7. RÉSIDUS D'ALTÉRATION ET SOLS FORMÉS.

Quantitativement, les résidus d'altération sont loin d'être négligeables.

Le tableau suivant donne les moyennes obtenues sur n échantillons :

TABLEAU IV  
*Résidus non carbonatés des roches carbonatées*

Type de roches	Age	Moyenne %	Variations	Nombre n échantil.
R. carbonatées dures	Jurassique, Cénomanién, Eocène Aptien supr.	2,2	0,4 à 6,6	26
R. carbonatées grossières poreuses	Eptien inférieur, Albien, Miocène	6,3	3,7 à 10,8	5
R. carbonatées tendres	Eocène	7,7	5,3 et 10,0	2

Il faut considérer que ces résultats ne tiennent pas compte des éléments grossiers des joints de stratifications ou des couches alternées de marnes ou calcaires tendres qui augmentent considérablement les pourcentages d'éléments non carbonatés de ces roches sédimentaires.

Partant de ces données, pour former 20 à 30 cm de sol, moyenne largement estimée pour le versant ouest du Mont Liban, avec 1,3 de densité pour le sol, 2,6 pour le calcaire et en évaluant, dans le sol, le complexe hérité des roches à 75 %, il faudrait :

- 3,5 à 4,7 mètres de carbonates durs,
- 1,2 à 1,6 mètre de carbonates grossiers,
- 1,0 à 1,3 mètre de carbonates tendres.

En prenant pour base 10 000 ans, comme temps de formation de ces 20 à 30 cm de sol, des dissolutions de roches carbonatées de 1/10 à 5/10 de mm par an seraient nécessaires. Or, ces valeurs sont 2 à 5 fois plus fortes que celles calculées à partir des pellicules d'altération ou de la charge en bicarbonates des eaux de ruissellement.

Un certain nombre d'impondérables subsistent, tels que les quantités d'éléments entraînés par les eaux sous forme de débits solides, et surtout les variations de l'intensité d'altération au cours des siècles.

S'il est difficile, sur le versant ouest du Mont Liban, de donner un âge à un sol de 20 à 30 centimètres d'épaisseur, il paraît vraisemblable qu'une forte proportion de ses éléments constitutifs s'est accumulée sur place, ou à peu près, par suite des dissolutions des roches carbonatées au cours des 10 000 dernières années.

Ces chiffres et ces estimations ont pour but de montrer le dynamisme et l'actualisme de cette pédogénèse méditerranéenne. Mais il faut particulièrement insister sur le fait que cette « pédogénèse vivante ou actuelle » n'est possible que sous un climat thermoméditerranéen atténué et très pluvieux, ce qui n'est absolument pas en contradiction avec les conclusions parfois opposées qu'ont tirées de nombreux auteurs, sous d'autres climats de la région méditerranéenne.

#### IV. — LES SOLS ROUGES FORMES SUR ROCHES DURES CARBONATÉES.

Bien que le Liban n'ait qu'une faible superficie, il n'en est pas moins très varié quant à ses paysages naturels et à ses sols.

Les sols rouges méditerranéens sont les plus représentatifs des sols de la montagne libanaise, formée en grande partie de roches dures carbonatées.

Deux grands modelés distinguent les paysages formés sur roches dures carbonatées :

— Un modelé karstique, aux roches fortement lapiézées, aux nombreuses dolines, etc... Les sols sont piégés dans une succession de poches isolées ou plus ou moins anastomosées.

— un modelé non karstique, dont les roches dures carbonatées se fissurent beaucoup moins et sont peu lapiézées. Les sols forment un recouvrement continu, plus ou moins épais.

##### 1. LES SOLS ROUGES DU KARST.

Le karst libanais peut se subdiviser en holokarst aux formations karstiques très développées (karst dolomitique de Reyfoun) et en karst ouvert ou mérokarst aux formations karstiques nettement atténuées (karsts de l'Hermon, de Sarba, etc...).

Bien que cette distinction soit importante à faire pour une étude détaillée des sols rouges méditerranéens, seules les poches de sols rouges, caractéristiques du karst, seront envisagées.

1.1. Description d'un profil de sol rouge formé dans une poche karstique.

A Koutaryé, sous 800 mm de pluie, sur calcaire dur cénomanien et sous une maigre végétation à graminées et poterium, le sol suivant a été observé dans une poche entre deux blocs rocheux.

Bon drainage, pente faible, érosion faible, altération importante :

0-15 cm :

Horizon brun rouge foncé, terne (7,5 YR 3/2 S et H).  
Argileux, non calcaire.  
Structure nuciforme, fine à très fine, très développée.

- A<sub>1</sub> Consistance : dure à sec,  
humide, très friable,  
trempé, très plastique à moyennement collant.  
Enracinement abondant, quelques silex.

15-35 cm :

Passage progressif.  
Horizon brun rouge (5 YR 3/3 S et H).  
Argileux, non calcaire.  
Structure polyédrique fine, très développée, facettes brillantes des agrégats.

- (B)<sub>1</sub> Consistance : dure à sec,  
très friable humide,  
plastique et collant, trempé.  
Surstructure : quelques gros éléments, à tendance prismaticocubique.  
Encore beaucoup de racines. Quelques cailloux calcaires.

35-100 cm :

Passage progressif.  
Horizon homogène rouge brun (5 YR 3/4 S et H).  
Très argileux, non calcaire.  
Structure polyédrique développée, mais moins bien individualisée qu'au-dessus, surtout en bas de l'horizon.  
Surstructure prismaticocubique, moyenne à fine.  
Peu poreux.

- (B)<sub>2</sub> Consistance : dure à sec,  
friable humide,  
trempé un peu plus collant et plastique qu'en A<sub>1</sub> (B).  
Quelques gros blocs calcaires et racines abondantes.

100-130 cm :

Passage progressif.  
Horizon plus rouge (2,5 YR 3/6 S et H).  
Très argileux, non calcaire.  
Structure polyédrique fine et développée.

- (B)<sub>3</sub> Petits polyèdres aplatis, aux angles aigus et aux facettes brillantes, beaucoup plus qu'au-dessus.  
Surstructure cubique assez grossière mais les faces ont tendance à l'obliquité.  
Consistance : dure à sec, à très dure,  
friable humide,  
plastique et collant trempé.  
Quelques concrétions tendres, riches en fer, s'individualisent.

130-145 cm :

Même horizon, mais des irisations brunâtres apparaissent sur la face des agrégats. Des individualisations de calcaires apparaissent contre les parois des gros blocs rocheux.

- (B)<sub>4</sub> Entre les plaques et plaquettes de roches calcaires, la terre est très rouge (2,5 YR 3/6), argileuse. Formation de pellicules d'altération. Il faut noter que la structure de cette terre est peu nette, les couleurs sont ternes et la masse humide a un aspect gélatineux.

- (B) C Assise rocheuse céromanienne, dure s'altérant fortement suivant les lignes de fissuration.

P E D O G E N E S E    D E S    S O L S    R O U G E S

TABLEAU V

*Fiche analytique du profil LX 319*

Behantillons	319.1	319.2	319.3	319.4	319.5	319.6	319.7	
Prof. cm.	0-15	20-30	50-70	90-100	110-125	130-145	150	
Refus 2 mm.	3,4	0,1	0,1	0,2	1,0	1,0	0,2	
S.G.%	1,9	0,6	1,4	0,6	0,5	0,7	1,1	
S.F.%	2,8	2,3	2,1	1,6	1,2	0,9	1,4	
S.T.F.%	9,9	9,4	9,0	7,6	5,3	4,0	3,3	
L%	18,6	15,6	13,6	12,6	8,5	8,0	4,0	
A%	68,1	73,2	75,2	79,2	83,8	87,3	86,8	
L/A%	27,2	21,3	18,0	15,2	10,1	9,1	4,6	
pH H <sub>2</sub> O	7,80	7,40	7,85	8,20	8,30	8,25	8,35	
Kcl	6,80	6,35	6,75	7,10	7,25	7,05	7,30	
CaCO <sub>3</sub> %	0	0	0	0	0	0	0	
C%	2,28	1,44	1,01	0,75	0,35	0,31	0,50	
N%	0,234	0,150	0,126	0,098	0,063	0,059	0,087	
C/N	9,7	9,6	8,0	7,6	5,5	5,2	5,7	
Complexe abst. méq.% (G.E%)	Ca	28,0	28,4	26,0	15,6	17,2	20,0	20,4
	Mg	2,8	2,4	2,0	8,0	5,6	4,0	3,6
	K	0,46	0,36	0,46	0,81	0,56	0,66	0,66
	Na	0,78	0,78	0,87	1,30	0,60	0,69	0,78
	So	32,04	31,94	29,33	25,71	23,96	25,35	25,44
(G.E%)	33,40	31,40	30,00	28,20	25,80	27,20	28,00	
Is	0,47	0,69	1,79	4,05	3,70	4,00	-	
Kcm./H	10,00	6,0	5,1	3,9	6,1	6,2	-	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T%	9,9	-	9,4	-	11,4	11,2	11,5	

Le profil de sol rouge méditerranéen formé dans une poche karstique est bien représentatif de ce type de sols rouges, parfois un peu moins argileux, parfois plus organiques quand la végétation est arborée.

Ce sol est très argileux, un peu limoneux en surface, mais il faut insister sur le fait qu'il est très fréquent d'observer une corrélation entre les taux de limon et la matière organique. En effet, l'eau oxygénée (méthode internationale) \*, même à chaud et appliquée en plusieurs fois,

(\*) Il a fallu 3 jours de contact pour détruire cette matière organique complexée, dans un échantillon de sable issu de l'analyse granulométrique.

ne détruit pas tous les complexes humus-argile-fer et l'observation des sables au binoculaire confirme ce fait.

Il s'en suit que les rapports de lessivage (ici 1/1, 24) se trouvent anormalement élevés, bien qu'insuffisants pour qu'il soit question de lessivage.

Ces sols sont généralement riches en montmorillonite et subissent de fréquentes alternances de dessiccation et d'humectation. Ce qui explique l'aspect brillant de toutes les facettes des agrégats polyédriques sur les trois quarts du profil, du sommet du (B) jusqu'en profondeur. Ces surfaces brillantes ne peuvent être que des facettes de lissage et non des revêtements qui seraient visibles au moins à l'observation binoculaire.

Le pH varie entre 7,5 et 8 en surface et devient supérieur à 8 en profondeur.

Il n'y a pas du tout de calcaire dans le profil.

La matière organique est surtout abondante en surface, bien qu'il s'agisse d'un sol à graminées et à potérium. Cette matière organique est bien évoluée.

Le complexe absorbant est saturé et dominé par le calcium.

### 1.2. Dynamique d'un profil située dans une poche karstique.

a) Le profil karstique vient d'être décrit comme une poche remplie d'un matériau très argileux (60 à 90 %) où domine le plus souvent la montmorillonite. Les pellicules d'altération, dues aux retraits de la masse argileuse, se forment aux dépens des parois rocheuses et des cailloux présents dans la masse.

Ces cailloux, plus ou moins abondants, sont souvent petits, émoussés et nombreux en surface, grands, émoussés et peu nombreux en profondeur. Cette teneur est variable car elle est fonction de la nature lithologique des roches et de l'intensité d'altération.

b) Altération dans le profil. Les niveaux d'altération observés dans ces poches sont les suivants :

A, *est un niveau aérien*, faiblement productif, en résidus d'altération, mais il alimente l'horizon humifère en cailloux.

M<sub>1</sub>, *horizon de surface humifère*, est par excellence l'horizon d'altération du fait des dégagements importants de gaz carbonique et d'acides organiques divers.

M<sub>2</sub>, *horizon profond*, est le siège d'altérations encore intenses.

S, *niveau souterrain*, fissuré, favorise le soutirage des argiles et surtout le drainage des sols. Les dissolutions peuvent s'y poursuivre, mais c'est souvent un milieu d'accumulation, du moins partiellement.

c) Mouvements dans les poches.

Les dissolutions des cailloux et des roches provoquent un départ très lent mais important de bicarbonates et des vides qui sont progressivement comblés par la masse argileuse plastique, dépourvue de squelette granulométrique.

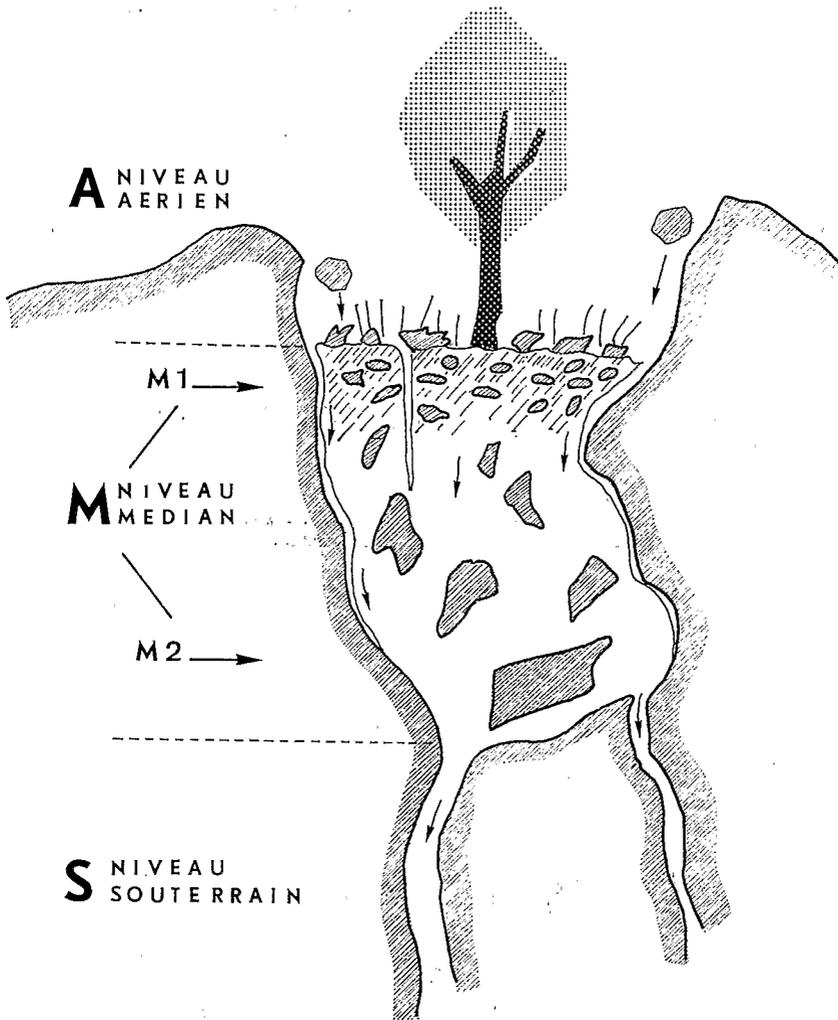


Fig. 5. — Sol rouge dans une poche karstique.

Si les mouvements de la masse tendent à un enfoncement vertical du sol, phénomène souvent observé au Liban et même au Maroc, des petits mouvements latéraux peuvent se produire à la faveur des déplacements de cailloux, suite aux alternances de dessiccation et d'humectation. Il semble même que des courants préférentiels existent le long des parois ou dans les fentes de retrait, mais il est plus difficile d'en dégager l'importance.

Ajouter à ces mouvements l'action de la faune et des racines, il n'est pas exagéré de parler alors de brassage très lent des sols de ces poches avec enfoncement vertical de la masse.

d) Un certain nombre de conclusions peuvent être tirées de ces observations.

$d_1$  — La notion habituelle de profil se trouve un peu modifiée : si les mouvements en question sont très lents et ne perturbent pas le profil organique, laissant apparaître un A et un (B), le C et le R sont partout présents dans le profil.

$d_2$  — La notion du C, réduit au cortex d'altération de la roche-mère, a été mise en évidence lors de l'étude de l'altération pelliculaire.

$d_3$  — Nourri de partout et souvent par son horizon  $A_1$ , humifère, ce type de sol rouge reste riche en calcium et magnésium solubles. Les résidus argileux de décarbonatation se répartissent dans la masse, si bien qu'un lessivage est difficilement concevable dans un tel milieu.

$d_4$  — Les mouvements dans ce sol argileux et surtout les alternances d'humectation et de dessiccation favorisent la formation de facettes de lissage brillantes, apparaissant nettement, même sur les plus petites unités structurales, sur toutes les faces, en haut comme en bas du profil.

$d_5$  — Des argiles de décarbonatation très anciennes peuvent parfaitement subsister dans ces poches, intimement mêlées aux argiles de décarbonatation plus récentes.

Tenter de vouloir donner un âge à des sols formés en régions karstiques, dans de telles conditions, apparaît comme une vaine entreprise.

## 2. LES SOLS ROUGES FORMÉS EN RÉGIONS NON KARSTIQUES.

Il est important de noter que le modelé de certaines roches dures carbonatées n'a plus du tout l'aspect rocailleux et déchiqueté du karst. Les sols ne s'enfoncent plus dans des poches mais restent en recouvrement sur le substratum rocheux. Il s'en suit une dynamique toute différente de celle décrite ci-dessus.

### 2.1. Description d'un profil de sol rouge méditerranéen sur des roches calcaires, non karstiques.

A Meitdoun, sous 800 mm de pluie, sur calcaire dur éocène, sans cultures, le profil suivant a été observé. Très bon drainage, pente de 10 % environ, érosion éolienne probable, altération pelliculaire très importante :

0-18 cm :

Horizon brun rouge (2,5 YR 3/4 S et H).

Argileux non calcaire.

Structure nuciforme moyenne, très développée, à tendance polyédrique. Moyennement cohérent à sec, peu poreux.

$A_1$

Enracinement bien développé.

Cailloux siliceux, (abondants 30 à 40 %), peu émoussés.

18-50 cm :

Horizon brun rouge (2,5 YR 3/4 S et H).

Argileux, non calcaire. Structure polyédrique.

Facettes des agrégats ternes.

$A_3$

Moyennement développée. Pas très cohérent, peu poreux. Beaucoup de racines.

Cailloux abondants (30 à 40 %), siliceux, plus gros qu'en surface.

50-180 cm :

- Horizon brun rouge (2,5 YR 3/6 S et H).  
Très argileux, non calcaire.  
Structuré nettement polyédrique.
- B ou (B) Facettes des agrégats brillantes. (Revêtements semblent possibles).  
Moyennement cohérent, non poreux.  
Par points extrêmement tassé. Peu de racines.
- RC Calcaire dur, mais très friable, facilement dissous et pénétré par les argiles rouges résiduelles. Altération pelliculaire extrêmement développée (1 à 3 mm).
- R La roche-mère, comme C, débute très haut dans le profil entre 50 et 100 cm. Elle est morcelée en gros blocs de 50 × 50 cm et en petits fragments facilement attaqués par les dissolutions.

Pris isolément, ce profil est difficile à interpréter. Il est très nettement appauvri en éléments fins, mais plusieurs hypothèses peuvent être formulées quant à cet appauvrissement :

- lessivage in situ,
- lessivage oblique,
- recouvrement sableux,

et c'est là toute la dynamique de cette pédogénèse en milieu non karstique. Le profil ou le « pédon » n'est interprétable que dans un ensemble plus large.

## 2.2. Dynamique de la pédogénèse en milieu non karstique.

Considérons la chaîne de sols dont fait partie le profil décrit ci-dessus :

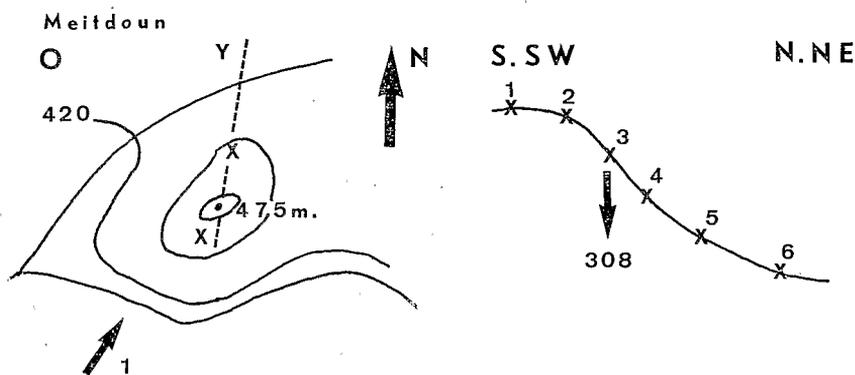


Fig. 6. — Chaîne de sols de Meitdoun.

1) Direction des vents secs dominants en été.

La chaîne de sols x y étudiée est située sur le versant S.S.W.-N.N.E. d'une colline de Meitdoun. C'est le versant à l'abri des vents chauds et secs dominants en été.

— Les sols du versant S.W., opposé aux vents secs d'été, sont des lithosols avec de petites poches de sols rouges de faible importance.

— En 1, le sommet est très rocailleux, des gros tas de cailloux témoignent d'anciennes cultures, la pente est faible, 1 % environ, la

végétation réduite à quelques pimprenelles et plantes herbacées diverses. Le sol n'a que 20 cm d'épaisseur, allant jusqu'à 50 cm entre les fentes.

— En 2, 200 mètres du sommet, c'est le début d'une pente de 10 à 15 %, suivant les points. Le sol était anciennement cultivé, il est aujourd'hui couvert de pimprenelles. Il a 50 cm d'épaisseur environ et il est recouvert de gros cailloux siliceux.

— En 3, nettement plus bas, c'est le profil 308 décrit ci-dessus.

— En 4, le sol a plus d'un mètre de profondeur, la roche sous-jacente n'apparaît pas encore à cette profondeur.

— En 6, le bas-fond est formé d'apports venant de la pente et du thalweg.

TABLEAU VI

Fiche analytique du profil LX 308

Echantillons	308.1	308.2	308.3	308.4	
Prond. cm.	0-15	30-40	60-80	120-140	
Refus 2 mm.	18,7	18,9	2,1	0	
S.G.%	4,6	3,0	0,6	0,4	
S.F.%	11,4	3,8	2,3	1,1	
L.G.%	4,9	11,4	4,1	1,9	
L.F.%	25,3	18,2	10,1	10,1	
A%	53,0	65,7	82,9	89,0	
SF/SG	2,8	1,27	3,84	2,75	
L/A%	47,8	27,7	12,2	11,3	
pH H <sub>2</sub> O	7,2	7,0	8,0	8,05	
CaCO <sub>3</sub> %	0	0	0	0	
C%	2,41	1,19	0,92	0,65	
N%	0,217	0,245	0,130	0,100	
C/N	11,1	8,2	7,1	6,5	
Complexe absorb. néq%.	{ Ca	12,4	12,0	20,8	20,0
	{ Mg	0,8	1,6	2,4	2,0
	{ K	0,15	0,08	0,09	0,09
	{ Na	0,21	0,21	0,27	0,17
	{ So	13,5	13,9	23,56	22,26
G+B%	16,2	16,8	25,8	24,60	
Is	0,67	1,32	2,08	2,45	
Kcm./H	5,0	4,5	3,7	5,9	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T%	8,7	10,0	12,1	12,6	

TABLEAU VII

Quelques résultats analytiques sur les sols de Meitdoun

Profondeur n°ordre	surface (0-15cm)						Profondeur (40-70cm)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Argile %	81	84,8	53,0	60,1	69,7	66,1	90,9	86,3	82,9	71,2	68,2	67,1
Sables fins + gros	1,9	2,5	16,0	8,9	4,4	3,8	0,9	1,4	2,9	4,1	4,0	3,1
Eléments > 2mm.	1,0	1,9	18,7	12,9	3,4	10,0	2,2	0,4	2,1	4,6	3,2	1,0
pH H <sub>2</sub> O	7,0	7,1	7,2	7,25	7,90	7,85	7,9	7,7	8,0	7,4	8,15	8,3

D'après la distribution des éléments texturaux dans les différents profils (Tableau VII), il est incontestable que des remaniements se soient produits le long de la pente. L'hypothèse qui vient à l'esprit en observant la figure 7 est celle d'un décapage du versant Sud-Ouest, sec et sous le vent, au profit du versant opposé à l'abri du vent.

En 0, le versant est décapé, il ne reste qu'un matériau rouge et argileux dans les poches et les fissures.

En 1 et 2, il reste 20 et 50 cm de sol.

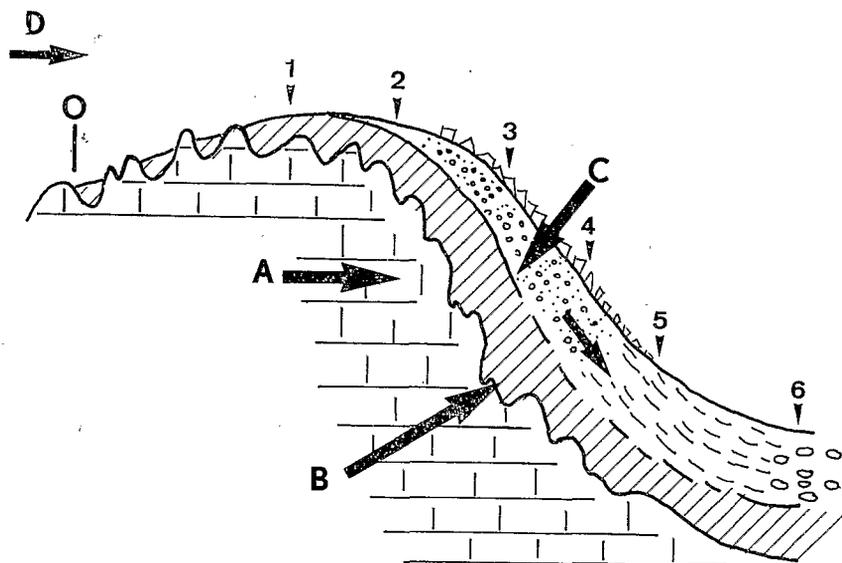


Fig. 7. — Distribution schématique des sols sur la chaîne de sols de Meitdoun.

- A) Roche-mère calcaire.
- B) Sol rouge autochtone.
- C) Partie colluviale.
- D) Vents dominants.

En 3 se seraient faites des accumulations plus sableuses en surface qu'en 4 et surtout qu'en 5 où il y a plus d'argile en surface qu'en profondeur.

Les taux d'éléments sableux et graveleux vérifient cette répartition. Le voile de cailloux est très abondant : il est formé de gros cailloux en 2 et 3, puis les cailloux diminuent régulièrement de grosseur jusqu'au bas-fond.

Si le vent et la sécheresse du versant Sud sont souvent à l'origine de pareils remaniements, d'autres causes peuvent être invoquées, telles que le ruissellement, les travaux culturaux, la lithologie et la stratigraphie.

Il paraît hors de propos de faire ici une étude détaillée et complète de cette chaîne de sols, mais il s'agit de mettre en évidence une pédogénèse propre aux sols formés sur roches dures carbonatées non karstiques.

Si, en zone karstique, la dynamique du profil est une dynamique ponctuelle ou verticale, en zone non karstique, il ne peut plus être question du profil, mais d'un ensemble de profils.

L'unité pédogénétique transgresse alors la notion de profil, du « pedon » américain, et même celle de chaîne de sols. En effet, pour comprendre les évolutions pédogénétiques dans un milieu comme celui qui a été décrit ci-dessus, il faut étudier tout un ensemble géographique de sols, comprenant les crêtes, les versants sous le vent et à l'abri du vent, les bas-fonds, etc..., unité qui pourrait être appelée « pedogénon ».

Enfin la dynamique de la pédogénèse en milieu non karstique va permettre de comprendre les évolutions pédogénétiques dans les sols rouges sur colluvions de piedmonts, dont il ne sera pas traité, dans cette note.

## V. — FORMATION ACTUELLE AU LIBAN DE SOLS ROUGES MEDITERRANEENS ET AIRE CLIMATIQUE DE CETTE PEDOGENESE.

Tout au long de cette note, l'accent est mis sur le dynamisme du « profil sol rouge méditerranéen » lié à un climat particulièrement agressif. S'il en est encore besoin, un faisceau d'observations et de faits peut être rassemblé pour montrer l'actualisme de la formation des sols rouges.

Dans le cadre géographique libanais, l'intensité de la pédogénèse de ces sols est représentée en fonction des facteurs climatiques et de certains éléments d'observation.

### 1. FORMATION ACTUELLE DE SOLS ROUGES.

L'altération des roches carbonatées n'est pas à démontrer, c'est une évidence, du moins sous une pluviométrie suffisamment forte (supérieure à 400 mm). Cette altération a été reproduite expérimentalement et les eaux de drainage chargées en bicarbonates ne laissent aucun doute sur le phénomène.

Il a également été montré que les teneurs en résidus non carbonatés de ces roches pouvaient à eux seuls constituer les sols observés sur le versant Ouest du Liban, ce qui n'exclut pas, dans certains cas, des apports de colluvionnement et, plus rarement, des apports éoliens.

L'étude de ces résidus non carbonatés (LAMOUREUX, 1966), faite sur un grand nombre d'échantillons, a montré que la plupart des roches contenaient des résidus de couleur brune (10 YR). La rubéfaction est donc un phénomène pédogénétique se produisant au cours de la décarbonatation.

Ceci signifie que des sols rouges méditerranéens continuent à se former actuellement, au fur et à mesure que se produisent les dissolutions de roches dures carbonatées.

Un certain nombre de faits et d'observations complémentaires contribuent à renforcer ces premiers résultats :

a) Il y a juxtaposition d'altérations intenses de roches carbonatées et de sols rouges. S'il y avait formation d'un autre type de sol, il serait visible, ne serait-ce qu'à l'état de traces.

b) Au cours d'une altération progressive, en plusieurs stades (LAMOUREUX, 1965), la formation résiduelle devient de plus en plus rouge.

c) Des calcaires gris-bleu, dont les résidus non carbonatés sont de couleur 5 Y 2/1, s'altèrent suivant une zone corticale très épaisse par oxydation du fer ferreux et les résidus dans la roche ont alors une couleur plus rouge, 10 YR 4/4, avant de passer à 5 YR dans le sol environnant.

d) Les altérations les plus intenses, voisines des roches et des gros cailloux, sont liées à des formations très rouges et peu structurées, donc peu évoluées.

En plusieurs points du Liban, à l'intérieur de fissures subhorizontales de blocs rocheux enfouis dans un sol brun à brun rouge (5 YR) plus ou moins calcaire, les formations suivantes ont été observées : d'une part, des pellicules d'altération (de 0,08 mm en moyenne) témoignent d'une dissolution actuelle de la roche ; d'autre part, des produits argileux peu épais, rassemblés par points, très rouges (2,5 YR), non calcaires et très peu structurés. S'il est difficile de prouver que ces produits rouges ont en totalité été formés en place, quoique le sol environnant soit bien différent, il faut admettre que les résidus d'altération de la roche ont contribué à les former et se sont rubéfiés relativement vite.

e) En altitude, sous une forte pluviométrie, en position topographique surélevée, avec érosion notable, des altérations importantes sont liées à des produits argileux, rouges (2,5 à 5 YR), non calcaires, et très mal structurés.

f) L'équilibre sols-climats, observé en de nombreuses régions du Moyen-Orient (Liban, Syrie, Jordanie), montre que, sur roches dures carbonatées, seuls des climats ou pédoclimats suffisamment humides (plus de 500 mm) se trouvent en équilibre avec des sols rouges décalcarifiés. Plus on va vers les climats arides, plus la couleur brune apparaît, corrélativement les teneurs en calcaires augmentent. Décarbonatation et rubéfaction vont de pair à cette échelle d'observation. A une échelle

plus petite, il faut tenir compte d'autres facteurs et surtout de l'âge des formations. C'est en effet sous les climats semi-arides que les témoins (glacis, terrasses, etc...) des pédogénèses quaternaires semblent s'être le mieux conservés ; il faut alors être prudent dans l'interprétation des correspondances sols-climats.

2. PÉDOCLIMATS ET AIRE CLIMATIQUE DE FORMATION DES SOLS ROUGES MÉDITERRANÉENS.

Un graphique pédoclimatique (fig. 8) a été établi suivant un principe déjà utilisé par BRYSSINE (1949), repris et légèrement modifié par BOULAINÉ (1965).

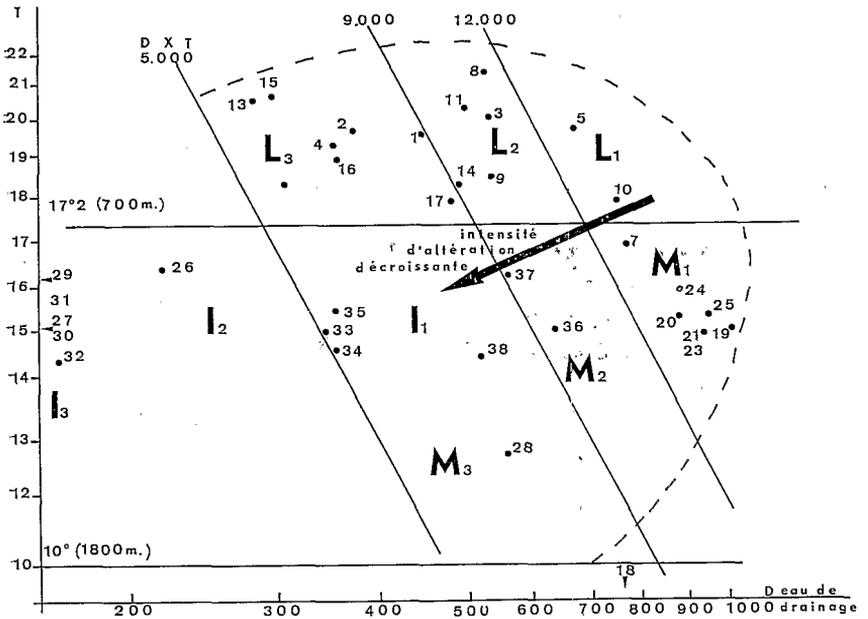


Fig. 8. — Aire climatique de formation des sols rouges et secteurs pédoclimatiques.

Les données utilisées sont les suivantes :

- P : pluviométrie moyenne annuelle en mm ;
- T : température moyenne annuelle en degrés C ;
- D : eau de drainage = P — ETP (Thornwhaité) ;
- $E_1$  :  $D \times T$ .

T et D sont portés en coordonnées logarithmiques, les droites  $E_1$  sont tracées et quelques stations, dont les sols ont été étudiés, sont placées sur le graphique.

2.1. *Zones pédoclimatiques.*

L'isohypse 700 sépare la zone littorale (L) des zones montagnardes (M) et intérieures (I).

Ces deux dernières sont séparées par la droite  $E_1 = 9\ 000$ .

L'isohypse 1800 isole un secteur montagnard  $M_3$ , très particulier par son pédoclimat.

2.2. *Secteurs pédoclimatiques.*

A l'intérieur de chaque zone, trois secteurs sont délimités en fonction de l'intensité d'altération, définie soit par la profondeur du front d'altération quand il est visible, soit par l'altération pelliculaire observée ou mesurée.

L'indice  $E_1 = D \times T$  a paru le plus approprié pour délimiter ces secteurs.

2.3. *Aire climatique de formation des sols rouges.*

La juxtaposition d'altération pelliculaire et de sols rouges ou bruns méditerranéens a permis de tracer une aire climatique à l'intérieur de laquelle des sols rouges méditerranéens se forment encore actuellement, d'autant plus intensément que l'indice  $E_1$  est plus élevé.

Cette aire climatique peut se définir par les paramètres suivants :

T	moyenne annuelle	—	10 à 22° C ;
P	moyenne annuelle	—	4-600 à 1 400 mm ;
D	(P — ETP)	—	200 à 1 000 mm ;
$E_1$	$E_1 = D \times T$ supérieur à 5 000.		

Les zones et les secteurs pédoclimatiques sont représentés géographiquement sur la carte du Liban (fig. 9).

2.4. *Pédogénèse et secteurs pédoclimatiques.*

2.4.1. *Secteurs pédoclimatiques dont la pédogénèse est surtout influencée par le climat.*

Suivant l'intensité d'altération, différents secteurs sont distingués :

— des secteurs d'intense altération ( $M_1$  et  $L_1$ ) dont l'indice  $E_1$  est supérieur à 12 000. Les pellicules d'altération sont généralisées, les entraînements en bicarbonates sont importants et profonds. Une karstification intense caractérise ces secteurs. Des colmatages peuvent se produire dans les fissures de certaines roches dures et provoquer un drainage déficient et l'apparition de la couleur brune d'une partie ou de la totalité des sols rouges (LAMOUREUX, 1966).

— des secteurs d'altération moyenne ( $M_2$  et  $L_2$ )

$E_1$  est compris entre 9 000 et 12 000.

— un secteur d'altération modérée ( $L_3$ )

$E_1$  est compris entre 5 000 et 9 000.

— un secteur d'altération faible ( $I_2$ )

$E_1$  est compris entre 5 000 et 1 000.

— un secteur d'altération nulle ou presque ( $I_3$ )

$E_1$  est inférieur à 1 000.

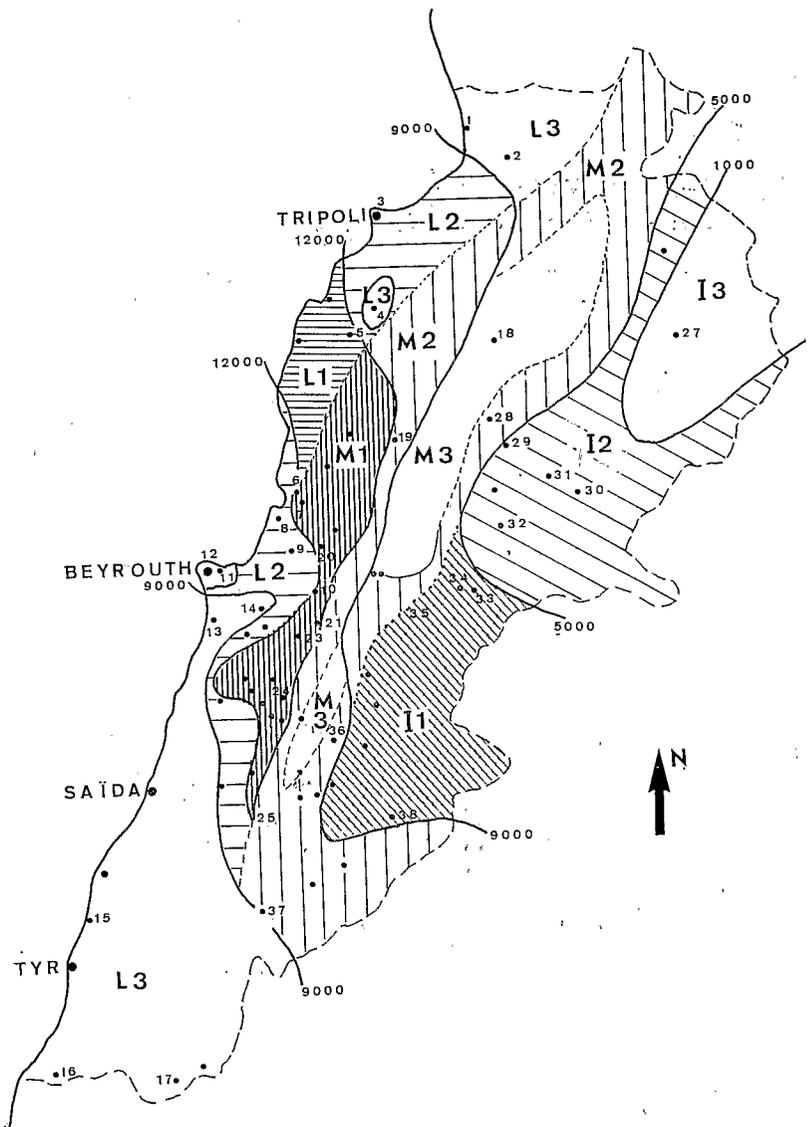


Fig. 9. — Zones et secteurs pédoclimatiques.

*Zone littorale* ( $T > 17,2^{\circ} C$ ) :

Secteur $L_1$	$E_1 > 12\ 000$
Secteur $L_2$	$12\ 000 > E_1 > 9\ 000$
Secteur $L_3$	$9\ 000 > E_1 > 5\ 000$

*Zone montagnarde* ( $T < 17,2^{\circ} C$ ) :

Secteur $M_1$	$E_1 > 12\ 000$
Secteur $M_2$	$E_1 < 12\ 000$
Secteur $M_3$	$E_1 < 12\ 000$ $T^{\circ} < 10^{\circ} C$

*Zone intérieure* :

Secteur $I_1$	$9\ 000 > E_1 > 5\ 000$
Secteur $I_2$	$5\ 000 > E_1 > 1\ 000$
Secteur $I_3$	$E_1 < 1\ 000$

Indice  $E_1 = D \times T^{\circ} C$ .

Jusqu'à  $E_1$  voisin de 5 000 et au-dessus, les altérations pelliculaires et les entraînements de bicarbonates sont nets. Les fronts d'altération se rapprochent de la surface quand  $E_1$  diminue. La brunification dans les sols rouges est de plus en plus rare.

Dans les secteurs où  $E_1$  est inférieur à 5 000, les altérations sont faibles, corrélativement les sols rouges ne se forment plus.

2.4.2. *Secteurs pédoclimatiques dont la pédogénèse est surtout influencée par le milieu.*

C'est, d'une part, le secteur  $I_1$  de la Bekaa centrale et sud qui reçoit plus de 600 mm de pluie et dont les sols sont soumis à une hydromorphie hivernale totale ou partielle.

Sur les parties bien drainées en bordure de la plaine et sur roches durs carbonatées, l'altération et la formation des sols rouges sont modérées, comme en  $L_3$ .

C'est, d'autre part, le secteur montagnard  $M_3$  au-delà de 1 800 m. La pédogénèse y est partiellement influencée par le milieu, tantôt très humide, tantôt très sec, occasionné par les précipitations nivales (chapitre II-4).

En pédoclimat humide, dans un milieu très bien drainé et sous une maigre végétation herbacée, des sols rouges méditerranéens peuvent parfaitement se former, apparemment sans limitation d'altitude.

2.4.3. *Pédogénèse hors de l'aire considérée.*

Il importe de savoir si au-delà des limites de cette aire préférentielle de formation des sols rouges, ce type de sol peut exister et éventuellement se former sur roches dures carbonatées.

a) A moins de  $10^\circ$  C, soit à plus de 1800 mètres d'altitude, des sols rouges (5 YR) peuvent être observés (2800 m au Qornet), dans un microclimat particulier.

b) Au-delà de  $22^\circ$  C, BRYSSINE (1949) et la plupart des pédologues considéraient que les sols méditerranéens cédaient la place aux sols ferrallitiques ou ferrugineux tropicaux. Des données récentes BOULAIN (1966), MARTIN-SIEFFERMANN et M. VALLERIE (1966), etc... ont montré que des sols rouges de types méditerranéens existaient sous des températures moyennes annuelles voisines de  $30^\circ$ , avec cependant alternances de saisons sèches et pluvieuses.

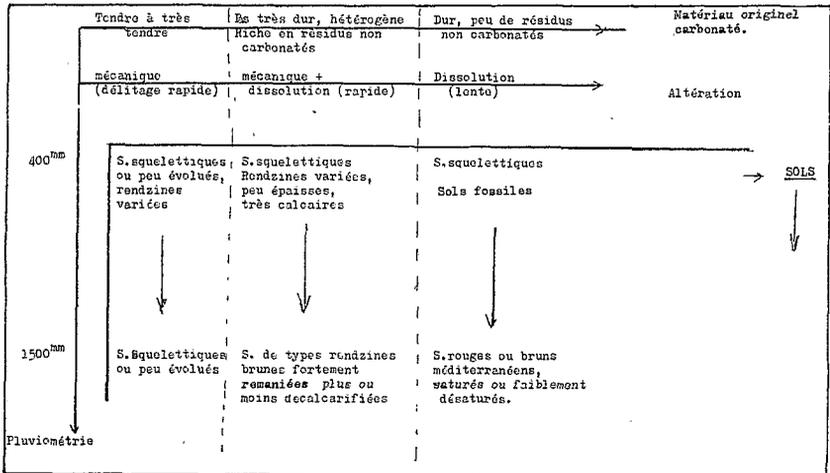
c) A moins de 400 mm de pluie, l'entraînement des sels solubles est trop faible et les sols restent très calcaires. Les sols rouges observés dans ces zones sont des sols fossiles en déséquilibre avec le climat actuel.

d) Sous une pluviométrie supérieure à 1 500 mm (qui n'existe pas au Liban) il ne semble pas, a priori, y avoir d'empêchement à la formation de sols rouges méditerranéens, pourvu que certaines conditions soient remplies, en particulier une saison chaude et sèche suffisamment longue, un très bon drainage du milieu, une végétation herbacée assez claire.

Il est évident que plus la pluviométrie augmente en montagne plus les possibilités de voir coexister ces conditions diminuent. En particulier la végétation sans être très dense se décompose très lentement et s'accumule dans les sols.

TABLEAU VIII

*Evolution pédogénétique des sols formés sur roches carbonatées sous le climat actuel du Liban*



VI. — CONCLUSION.

Il est de la plus haute importance en pédogénèse de mettre l'accent sur les mécanismes de l'évolution des sols. Cette dynamique des altérations, des solutions, de la structure, etc... permet de comprendre un certain nombre de phénomènes aussi bien présents que passés.

Il semble qu'un des facteurs essentiels conditionnant la rubéfaction des sols soit l'alternance d'une saison sèche chaude suffisamment longue d'une saison humide assez pluvieuse, mais fraîche. Des variations d'intensité telles qu'elles ont pu se produire depuis le quaternaire moyen, par exemple, n'ont certainement pas affecté le sens de cette évolution pédogénétique rubéfiante. La température élevée en saison sèche n'affecterait pas non plus cette évolution, mais en saison des pluies de fortes températures favorisent les hydrolyses et de ce fait les conditions ferralitisantes.

Dans le cadre d'un tel climat à saisons alternées sèches et pluvieuses avec une pluviométrie moyenne ou élevée (700 à 1500 mm) l'eau de pluie imprègne le sol suffisamment longtemps pour produire des dissolutions, des hydrolyses ménagées, sans toutefois aboutir à une dégradation notable des matériaux silicatés.

Des produits initialement bruns dans les roches subissent une rubéfaction parallèlement à la dissolution des carbonates si les conditions de milieu le permettent. En milieu aéré, bien drainé, les bicarbonates sont rapidement éliminés et les phénomènes d'oxydation peuvent intervenir pendant toute la durée de la saison sèche.

En milieu confiné, plus ou moins bien drainé, les bicarbonates ne sont pas ou sont très mallixiviés et l'oxydation des hydroxydes n'aurait pas le temps de se produire du fait d'une période de dessiccation trop courte.

Un sol rouge, méditerranéen, climatique, est ou n'est pas en « activité ».

1) S'il n'est pas en « activité », les phénomènes d'altération des roches carbonatées ne sont pas observables. Ce qui signifie que la pluviométrie est trop faible pour entraîner, mêmes les éléments les plus solubles et ceci s'observe en-dessous de 400 mm. L'histoire pédogénétique s'inscrit alors dans une morphologie généralement bien conservée.

A côté de sols fossiles, semblables à des sols tropicaux plus ou moins ferrallitiques, s'observent des sol rouges plus jeunes, décalcarifiés, parfois un peu désaturés, des sols bruns très calcaires, des loess plus ou moins évolués, etc... l'ensemble s'ordonnant assez bien suivant un étage chronologique déterminé.

2) Si le sol est « en activité » sous une pluviométrie élevée, les altérations de roches carbonatées sont observables et mesurables.

De ces altérations naissent des sols rouges, bruns ou blancs, plus ou moins décalcarifiés suivant les conditions locales. La vitesse de ces altérations, fabriquant le sol, et les phénomènes érosifs sont alors en compétition et doivent être pris en considération.

*Si l'altération est lente et l'érosion minime*, cas des karsts sur roches carbonatées dures, les petites quantités de résidus abandonnées par les dissolutions sont totalement décalcarifiées et s'amalgament parfaitement bien aux agrégats polydriques des sols rouges. Les hydroxydes de fer ont alors le temps de s'oxyder dans ce milieu bien structuré et sec.

Si l'altération est rapide, cas des désagrégations mécaniques des marnes, calcaires marneux, etc... les quantités de carbonates offertes aux dissolutions sont énormes eu égard au pouvoir dissolvant limité des eaux de pluies.

La masse désagrégée et sans structure, forme une pâte imperméable qui caractérise enlevée par l'érosion, d'autant plus que la morphologie très caractéristique ces matériaux favorise le ruissellement et le ravinement. Les résidus non carbonatés ne sont même pas libérés de leur gangue de carbonates, les sols restent à l'état de régosols, de sols peu évolués, tout au plus de rendzines grises ou blanches quand la matière organique est abondante.

Entre ces deux cas extrêmes se situe un ensemble de sols plus ou moins calcaires et dont la pédogénèse s'explique assez mal : des rendzines rouges, des sols bruns calcaires, des sols bruns à caractères vertiques, des sols bruns pouvant être rattachés aux sols dits isohumiques, etc...

Il est hors de propos d'étudier les différents cas cités, bien que chacun de ces types de sols puisse assez bien s'expliquer à partir du contexte climatique et du matériau parental. Mais ici intervient non seulement la vitesse d'altération :

$$V_a : E_p \times D_s$$

$E_p$  est la quantité d'eau percolée en un point et en un temps donné,

$D_s$  le degré de solubilité du matériau,

mais également le milieu qui conditionne le paramètre  $E_p$ .

Le milieu, dont il a été question dans cette note même, concrétise cette notion de pédoclimat souvent citée, mais jamais bien définie.

Ces différents facteurs auxquels s'ajoutent les matières organiques, les remaniements naturels ou humains contribuent à former des sols souvent très calcaires, caillouteux, plus ou moins structurés et bruns.

Le sol rouge dit méditerranéen est en fait l'aboutissement d'une évolution, souvent stoppée dès le départ ou en cours de développement suivant le schéma ci-joint.

Dans un contexte plus général, le sol rouge méditerranéen apparaît comme un sol saturé à faiblement désaturé, dans lequel les phénomènes d'hydrolyse des silicates sont considérablement ralentis.

Ce sol décarbonaté totalement ou presque est dominé par la dynamique du fer imprégnant la totalité des ménaroux argileux du profil. Sous sa forme amorphe ce fer représente 20 à 30 % du fer total et serait directement responsable de la couleur rouge du matériau (SEGALEN, 1967).

Le milieu sol rouge est un milieu aéré, bien drainé, favorisant les altérations et les lixiviations de bicarbonate, plus que les accumulations. Le matériau du sol rouge, généralement argileux, subit de nombreux remaniements sur place dans les poches ou par colluvionnement le long des pentes.

*Reçu pour publication le 12 juin 1967*

#### BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT G., 1965. — Classification des sols. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, III, n° 3.
- AUBERT G. et SEGALEN P. — Projet de classification des sols ferrallitiques. Non publié. Réunion de l'Orstom. Septembre 1966.
- BOULAIN J., 1965. — Renseignements oraux.
1966. — Sur les facteurs climatiques de la genèse des sols rouges. Conférence sur les sols méditerranéens. Madrid.
- BRYSSINE G., 1949. — Les facteurs climatiques de la pédogenèse au Maroc. Les Cahiers de la Recherche Agronomique. Rabat.
- DESAUNETTES J.-R., 1966. — Sols rouges méditerranéens en altitude. Conférence sur les sols méditerranéens. Madrid.
- DUBERTRET L., 1951. — Carte géologique au 50 000°. Feuille de Beyrouth.
- GEZÉ B., 1947. — Paléosols et sols dus à l'évolution actuelle. C.R. de la Conférence de pédologie méditerranéenne. Alger - Montpellier.
- LAMOUROUX M., 1965. — Observations sur l'altération des poches calcaires sous climat méditerranéen humide (Liban). Cahiers Orstom. Pédologie. Vol. III, n° 1.
1966. — A propos de la formation des sols rouges méditerranéens sous le climat humide et subhumide du Liban.
- Conférence sur les sols méditerranéens. Madrid.
- LAMOUROUX M., 1967. — Les sols bruns méditerranéens et les sols rouges partiellement brunifiés du Liban. Publication en cours.
- LAMOUROUX M., THIÉBAUD M. et SALHOUNY M. — Roches carbonatées et les eaux de ruissellement en pédogenèse méditerranéenne. En préparation.

- LAMOUROUX M., PAQUET H., MILLOT G., 1967. — Note préliminaire sur les argiles des sols du Liban. En cours de publication.
- LAMOUROUX M., AUBERT G., 1966. — Les sols bruns méditerranéens formés sur calcaires durs du Liban. Conférence sur les sols méditerranéens.
- MARCELIN P., 1960. — Sur la terre rouge. Bulletin de la Société d'Etude des Sciences Naturelles de Nîmes.
- MILLOT G., 1964. — Géologie des argiles. Masson et Cie, Paris.
- PABOT M., 1959. — La végétation sylvopastorale au Liban et son écologie. FAO.
- SEGALEN P., 1964. — Le fer dans les sols. Initiations. Documentations Techniques Orstom, n° 4.
- TRIGART J., 1965. — Principes et méthodes de la géomorphologie. Masson et Cie.
- YAALON D. H., 1965. — Clays and some non carbonate minerals in limestones and associated soils of Israël.

## CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE RED MEDITERRANEAN SOILS GENESIS

### SUMMARY

*Under humid mediterranean climate, the weathering of hard calcareous rocks is attributed to a physico-chemical process, called « altération pelliculaire ».*

*In the red mediterranean soils, constituted essentially of the residues of rock decarbonation, the silica is moderately leached by drainage water, while the hydroxides are affected very little.*

*In the karstic pockets the red soils undergo a remodeling limited to the pocket itself or to the neighbouring ones. In non karstic regions, soils can be carried from one side of the hill to the other side or to the Coothill. It constitutes then, remodeled red soils without any relation to the underlying bedrock. The red soils of humid or subhumid Lebanon are undoubtedly « recent » soils.*

*The climatic region where these soils were formed is characterised by the following parameters :*

*T° annual means — 10° — to 22° C.*

*P annual means — 600 mm to 1400 mm.*

*D (drainage = P — ETP) — 200 mm to 1000 mm.*

*E<sub>1</sub> (D × T) Above : 5000.*

*The red mediterranean soils appear as decarbonated soils, mostly saturated and with a moderate silicates hydrolysis. The existence of these soils is due to a cold rainy season (Above 600 mm), as well as a dry hot season (dry soil atmosphere for at least four months).*

Extrait de *Science du Sol*  
1967, 2, pp. 55-86

# CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA PÉDOGÉNÈSE EN SOLS ROUGES MÉDITERRANÉENS

M. LAMOUREUX

(Mission ORSTOM RAYAK LIBAN)

26 AVR. 1976

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° B 8103 Peds