

Pedo

Roches Carbonatees et Eaux du Liban

M. Lamouroux, M. Thiebaud & M. Sahyouni

PUBLICATION N° 22

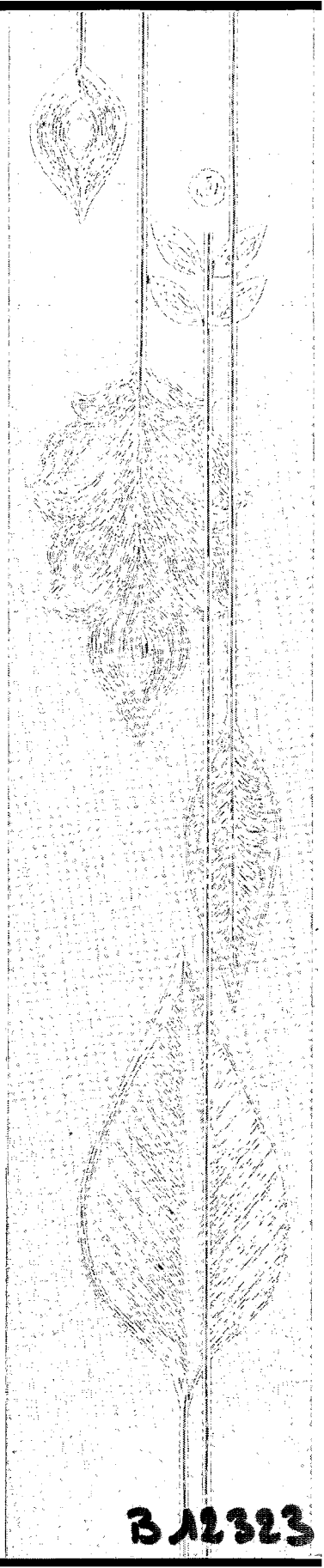
(Série Scientifique)

MAI 1968

INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES
LIBAN

MAGON

312323



MAGON. — Écrivain carthaginois qui a vécu vers 140 av. J.-C. Il écrivit en 28 volumes un Traité sur l'Agriculture et la Médecine Vétérinaire qui fut traduit en latin par ordre du Sénat.

Extrait de *L'Histoire de l'Agriculture Ancienne*
par A. ABOU NASSER, Beyrouth 1960.

M A G O N

INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES
LIBAN

Publication N° 22

Série Scientifique

Mai 1968

ROCHES CARBONATEES ET EAUX DU LIBAN (Observations — Analyses — Aspects géochimiques)

PAR

M. LAMOUREUX, M. THIEBAUD & M. SAHYOUNI

SOMMAIRE

	PAGE
I — INTRODUCTION	1
II — OBSERVATIONS ET RESULTATS ANALYTIQUES	1
III — DISCUSSION	16
IV — CONCLUSION	26
V — RESUME	27
VI — BIBLIOGRAPHIE	29

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

Collection de Référence

5 SEPT 1968

n°/2323 ex 1

ROCHES CARBONATEES ET EAUX DU LIBAN

(Observations — Analyses — Aspects géochimiques)

PAR

M. LAMOUROUX*, M. THIEBAUD* & M. SAHYOUNI**

I — INTRODUCTION

Il a été question, dans différentes notes (Lamouroux 1965-66), des propriétés physiques des roches carbonatées et de leurs influences sur la nature des sols formés, ainsi que des modes d'altération de ces roches.

D'autres aspects de l'étude des roches carbonatées restent à aborder : nature chimique des roches et de leurs altérations, nature des résidus non carbonatés et dynamique des principaux éléments au cours de la pédogénèse.

De grosses difficultés apparaissent avec les roches carbonatées dès qu'il s'agit d'interpréter un phénomène évolutif. Le comportement géochimique des principaux éléments, esquissé dans cette note, devrait être suivi en fonction de la nature des roches carbonatées sur le terrain et au laboratoire, dans les roches, les sols et dans les solutions du sol.

II — OBSERVATIONS ET RESULTATS ANALYTIQUES

2.1 — Résidus non calcaires des roches carbonatées.

Les roches carbonatées ne sont jamais intégralement constituées de carbonates, elles contiennent une partie, généralement

* Directeur de recherches et chimiste de l'ORSTOM, détachés à l'Institut de Tel Amara.

** Chimiste à l'Institut de Tel Amara.

faible, d'éléments non calcaires dont les accumulations au cours des siècles aboutissent à la formation des sols, après dissolution et entraînement des carbonates.

Des roches, réduites en poudre, ont été traitées par un mélange d'acide acétique à 10% et d'acétate d'ammonium. Le pH de cette solution est de 4,2 et varie de 4,7 à 5,4 pendant le traitement.

Cette attaque ménagée des carbonates entraîne un minimum d'éléments non calcaires et un peu de fer à l'état ferreux. Les résidus ainsi traités et lavés ont fait l'objet d'observations, notamment la couleur a été étudiée en relation avec celle des sols sus-jacents. Un examen, à la loupe binoculaire, a permis d'apprécier la nature de ces résidus et quelques analyses minéralogiques ont pu la préciser. Les évaluations quantitatives ont été effectuées à partir des analyses totales.

2.1.1. — Couleur des résidus

Quelques exemples sont donnés sur le tableau 1. Des roches-mères variées ont été choisies, en fonction de la nature des sols formés, sols rouges et bruns méditerranéens, sols gris ou bruns plus ou moins calcaires.

La codification des couleurs est celle du «Munsell soil color charts», à partir d'échantillons humides.

— La teinte de presque tous les échantillons traités est une teinte brune (10 YR), parfois plus grise (2,5 Y), rarement plus rouge (7,5 à 5 YR), sauf quand il s'agit de conglomérats tertiaires, dont les ciments sont généralement rouges. La valeur et le chroma sont assez variables suivant les échantillons.

— Les couleurs très claires des roches sont en relation avec des teneurs élevées en carbonates, mais dès que les résidus augmentent (plus de 3 à 5%), ils donnent à la roche leur couleur : gris bleu, ocre-jaune, rougeâtre, etc...

— Des corrélations peuvent également être établies entre la couleur des résidus et celle de l'horizon profond des sols calcaires ou des sols bruns méditerranéens. *Il n'y a aucun rapport entre la couleur des résidus (10 YR) et celle des sols rouges méditerranéens (2,5 à 5 YR),* sauf quand il s'agit de conglomé-

rats à ciment rouge.

— La couleur des résidus non carbonatés des roches peut cependant être sensiblement modifiée au contact de la biosphère, suivant la porosité des matériaux.

Une marne, peu perméable à l'eau et à l'air, gardera des teintes gris verdâtre, jusqu'à quelques centimètres de la surface du sol. Les roches dures ont une porosité variable, mais non négligeable, et très souvent, les résidus non carbonatés des roches subissent des transformations notables au contact de l'air ou de l'eau. Ainsi il est fréquent d'observer des blocs calcaires dont le noyau, de couleur gris-bleu (2,5 à 5 Y 2/1), est enveloppé d'un cortex brun-ocre (10 YR 4/4).

Ces calcaires sont souvent riches en résidu et le fer, à l'état ferreux dans le noyau de la roche, s'oxyde lentement sur son pourtour au contact des solutions du sol.

TABLEAU I Couleur des résidus non carbonatés des roches

Echant.	Roche-mère			Résidus non carbonatés couleur	Sol	
	Agé	Nature et lieu	Couleur		Couleur	Type
Cd	C4	Dolomie Sfarey	—	2,5 Y 4/2	2,5 YR 4/3	S.R.M.
319	C4	Calcaire dur-Koutaryé	10 YR 8/1	10 YR 4/2	2,5 à 5 YR 3/6	S.R.M.
30	C4	Calcaire dur-Aarsal	7,5 YR 8/2	10 YR 4/3	5 YR 3/4	S.R.M. calcaire
49	C4-5	Calcaire dur-Insaar	10 YR à 2,5 Y 8/2	10 YR 7/3	5 YR 3/3	S.R.M.
58	E	Calcaire dur-Ksar Naba	blanc	10 YR 5/4	—	S.R.M.
308	E	Calcaire dur-Zaoutar	2,5 Y à 10 YR 7,5/2	10 YR 3/2	2,5 YR 3/6	S.R.M.
247	J7	Calcaire dur-Bhannès	10 YR 7/4	10 YR 4/6	10 YR 5/6	S.B.M.
344	J6	Calcaire dur-Aintoura	10 YR à 2,5 Y 8/1	10 YR 3/1	10 à 7,5 YR 4/4	S.B.M.
324	J6	Calcaire dur-Bekaata	10 YR à 2,5 Y 8/1	10 YR 2/1	10 YR 4/4	S.B.M.
300	J7	Calcaire dur-Salima	10 YR 6/3	7,5 à 10 YR 3/2	10 YR 4/4 à 5/6	S.B.M.
Cm	E	Calcaire tendre-Sarafand	—	2,5 à 10 YR 6/3	10 YR 5/2	S. brun vertique
44	3	Calcaire tendre-Sarafand	10 YR à 2,5 8/2	10 YR 5,5/3	10 YR 5/4	Vertique
34		Calcaire tendre	10 YR 8/2,5	10 YR 6/3	10 YR 4/1	S. brun calcaire
40		Calcaire crayeux	10 YR 8/3	10 YR 5/3	10 YR 7/4	Rendzine blanche à horizon
59		Conglomérat-Es Saïdé	5 YR 5/4	2,5 à 5 YR 4/8	5 YR 3/4	S. châtain

Abréviations : C4 — Cénomanien — J6 = Jurassique moyen et supérieur.

E = Eocène.

S.R.M. — Sol rouge méditerranéen.

S.B.M. — Sol brun méditerranéen.

2.1.2. — Nature des résidus

Un examen, à la loupe binoculaire, permet de distinguer une pâte brune, apparemment amorphe, enveloppant des éléments grossiers, bien individualisés.

La pâte représente la plus grande partie du résidu. Elle est brune, mâte, parfois noire et brillante. Le carbone organique, effectué sur ces résidus (méthode Anne) semble être en corrélation avec une couleur brun-foncée qui serait due, dans de nombreux cas, aux matières organiques, parfois au fer ferreux. La pâte, séchée, puis réhumectée avec de l'eau, laisse dans certains cas, apparaître un morcellement anguleux, faisant penser à une ébauche de structure polyédrique.

Quelques éléments grossiers, bien individualisés et de grosseurs variables, apparaissent enrobés par cette pâte.

La silice constitue l'élément essentiel de ces débris grossiers ; ce sont : — de petits quartz, hyalins et arrondis, parfois rhomboédriques,
— des éléments siliceux probablement, opâques et à angles vifs,
— des débris silicifiés d'anciens tests calcaires ou de matières organiques variées.

Les oxydes métalliques imprègnent de petits éléments, noirs ou bruns, donnant une forte effervescence à l'eau oxygénée.

Des éléments grossiers, semblables, se retrouvent dans la fraction sableuse des sols.

Un certain nombre d'analyses minéralogiques (tableau II) met en évidence la nature assez variée des minéraux argileux présents dans les résidus des roches sédimentaires du Liban (M. Lamouroux, H. Paquet, M. Pinta et G. Millot 1968). A côté des débris variés : quartz, calcite, dolomite, hydroxydes, des minéraux argileux préexistent dans les roches calcaires. Dans deux échantillons le matériel est amorphe, dans certains d'entre eux (151-21) les diagrammes aux rayons X sont peu intenses. Mais généralement les minéraux argileux existent en quantité notable :

- la montmorillonite est souvent présente et abondante, parfois exclusive et bien cristallisée, comme dans les calcaires tendres éocènes du Liban Sud,
- l'illite semble moins fréquente, mais elle peut-être très abondante dans certains échantillons (319-342). La kaolinite est souvent présente, en quantité relativement faible.

2.1.3. — Hétérogénéité des résidus.

2.1.3.1. — Hétérogénéité dans une série sédimentaire.

La nature minéralogique des matériaux met en évidence de grandes variations d'un type de roches à un autre. Il existe, en outre, une hétérogénéité souvent importante dans la quantité de résidus, en différents points d'une même série sédimentaire.

Ainsi au Baldar dans une série de l'Albien nous observons, sous un sol brun calcaire, des alternances de calcaires durs massifs ou feuilletés, ocres ou bleus, et de marnes verdâtres. Le tableau III donne une idée des variations importantes dans les pourcentages de résidus non carbonatés de cette série.

Les calcaires durs contiennent 6% de résidus dans l'assise gris-bleu non altérée, 10,9% dans la couche ocre feuilletée, 12,6 à 16,6% dans les calcaires ocres et massifs et jusqu'à 21,1% quand des marnes viennent s'intercaler avec les calcaires.

Il faut noter, dès maintenant, l'importance de ces observations en pédogénèse :

- sur des séries à alternances de couches plus ou moins calcaires et subhorizontales, les sols étudiés, même s'ils sont en place, n'auront pas forcément pour roche-mère le substratum rocheux sous-jacent, mais une couche de la série, bien différente de celle observée et dont l'altération aura fait disparaître les traces.
- Les prélèvements d'échantillons de roche-mère, faits à la base d'un profil, correspondent souvent à une partie homogène de l'assise rocheuse, plus pauvre en résidus non carbonatés que d'autres parties déjà altérées et peu visibles.

TABLEAU II
Minéraux argileux de quelques roches carbonatées du Liban.

Echant.	Nature	Age et lieu	Minéraux argileux			Autres éléments
			Montmorillonite	Kaolinite	Illite	
20	Calcaire dur	J6 Baabdat	70	30	Traces	Quartz très abondant
237	Calcaire dur	C4 Tibnine	40	Traces	60	
151	Calcaire dur	J6 Monte Verde	Traces	Traces	—	
319	Calcaire dur	C4 Koutaryé	—	Traces	100	Calcite
315	Dolomie	C4 Djezzine	30	20	50	Dolomite
342	Dolomie	Kamoua	—	Traces	100	Dolomite
343	Calcaire grossier	Aïntoura	70	30	—	Calcite
287	Calcaire dur	J7 Zandouka	amorphe			Quartz
341	Calcaire		amorphe			Calcite
344	Calcaire dur	J6 Aïntoura	Complexe	Illite-Montm.	(100%)	Calcite
215	Calcaire	E Sarafand	Traces	Traces	100	Calcite

TABLEAU III

Résidus d'une série albienne du Baïdar.

<i>Nature du matériau</i>	<i>Épaisseur en cm</i>	<i>Quantité de résidus</i>	<i>Couleur humide des résidus</i>
Sol brun calcaire	20	53,5	10 YR 5/4
Calcaire dur, massif	25	12,6	10 YR 4/6
Marnes vertes	60	29,5	5 Y 5/3
Calcaire dur, massif	35	16,6	10 YR à 2,5 Y 5/4
Calcaire feuilleté et marnes	20	21,1	10 YR à 2,5 Y 4/3
Calcaire dur, ocre	40	15,0	10 YR 4/6
Marnes	10	30,3	2,5 Y 5/4
Calcaire du massif, gris-bleu	140	6,0	2,5 Y 2/0
Calcaire dur feuilleté ocre	45	10,9	10 YR 4/3

2.1.3.2. — Hétérogénéité dans une même strate de la série.

Sous un même profil et sur environ 20 mètres de distance, 5 échantillons étudiés, présentent des variations notables de couleur dans la teinte 10 YR et quantitativement le résidu non carbonaté passe de 0,84% à 1,76% de la roche. Un 6ème échantillon, prélevé dans un conglomérat localisé sous le même profil, contient 2,73% d'un résidu rouge (5 YR), reste probable de vieux sols fossiles « piégés » dans le conglomérat.

Dans certaines roches il n'est pas rare d'observer des alternances de dolomite et de calcite, parfois de minces couches de fer, de pyrite, etc...

La présence dans certains calcaires (séries éocènes de Saïda, Jurassique supérieur du N. Beyrouth, etc...) de bancs ou de rognons de silex ou d'autres inclusions variées est encore une marque de cette hétérogénéité.

Ces inclusions ne sont pas toujours perceptibles à l'observation, ce qui rend très difficile un prélèvement représentatif

de roche-mère.

2.2. — Analyses chimiques de poches carbonatées et d'eaux de ruissellement du sol

Dans le cadre des études de pédogénèse entreprises au Liban, il importe de connaître d'une part la nature chimique des matériaux sédimentaires sur lesquels se développent les sols; d'autre part les éléments que transportent les eaux du sol et les eaux de ruissellement. A notre connaissance peu d'analyses minéralogiques ont été effectuées sur les roches du Liban, par contre de nombreux échantillons d'eaux ont déjà été analysés, mais rarement avec l'optique du pédologue.

2.2.1 — Roches carbonatées

A titre d'exemple, le tableau IV donne les résultats analytiques d'échantillons considérés comme assez représentatifs des roches carbonatées du Liban.

Si, pour certains calcaires tendres ou grossiers, les teneurs en résidus non carbonatés sont relativement élevées et permettent d'obtenir des résultats appréciables avec les méthodes utilisées, il n'en est pas de même pour beaucoup de calcaires durs. Des teneurs en silice, fer ou aluminium bien inférieures à 1% et même 1‰ sont fréquentes, atteignant parfois les limites des erreurs analytiques, il devient alors illusoire d'interpréter des variations ou des rapports faisant intervenir de telles valeurs.

Le calcul du résidu non carbonaté est basé sur les analyses totales effectuées sur des sols dont la somme de la silice et des hydroxydes représente en moyenne 95% du poids du sol. Il suffit alors de faire la somme ($\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3$) et de l'augmenter de 5% de sa valeur pour obtenir une estimation du résidu non carbonaté.

Le calcium et le magnésium représentent la plus grande partie de ces roches sédimentaires.

Le titane et le manganèse n'existent qu'à l'état de traces ou en quantités difficiles à déceler, avec les méthodes utilisées.

Le phosphore, à l'état de traces dans les roches dures, riches en carbonates, est assez abondant dans les calcaires

grossiers, les calcaires tendres ou les marnes.

La silice et l'aluminium semblent exister en proportions assez variables dans les calcaires durs ou dans les dolomies, avec cependant une tendance aux faibles rapports moléculaires $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Ce même rapport devient beaucoup plus régulier dans les calcaires grossiers ou tendres, peut-être parce que les chiffres obtenus sont plus élevés, donc moins entâchés d'erreurs que dans les calcaires durs : il varie de 2 à 4 dans les calcaires grossiers, de 6 à 8 dans les calcaires tendres pour atteindre 14,6 dans une marne.

Les teneurs en fer (Fe_2O_3) dépassent rarement plus de 10% du résidu non carbonaté, sauf dans les calcaires grossiers ocre du Jurassique supérieur, de l'Albien ou de l'Aptien où il peut représenter 20 à 35% du total.

2.2.2. — Roches carbonatées et produits d'altération

Les produits d'altération des roches carbonatées et surtout des roches dures, très riches en carbonates, peuvent être mis en évidence, mais assez difficilement. Isoler ces produits pour les étudier conduit à des interprétations délicates et souvent contradictoires.

- En effet, malgré une prise d'échantillons minutieuse, il peut y avoir localement une hétérogénéité du matériau, suffisante pour faire varier nettement des rapports moléculaires portant sur des valeurs très faibles.
- La partie altérée est généralement poreuse et au contact du milieu environnant, les contaminations ne peuvent par être exclues.
- Les valeurs obtenues par les méthodes habituelles, portant sur 1 gramme de roche pulvérisée, sont souvent si faibles que l'erreur analytique prend une grande importance relative.

Malgré ces difficultés, un essai d'interprétation sera tenté sur quelques roches dont les résidus sont assez importants et les altérations bien caractérisées.

Le tableau V présente un ensemble de résultats analyti-

ques comparatifs, entre les roches saines (RS) d'une part, et leurs produits d'altération d'autre part (roche altérée : RA, croûte ferrugineuse : CF, argile : A).

— Milieu bien drainé

C'est le milieu «sol rouge», bien aéré, où les eaux de pluie ne séjournent pas.

En 308 — Résidu non carbonaté, peu important. Les rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou Fe_2O_3 , augmentent fortement dans la roche altérée. Aluminium, fer et titane, seraient entraînés modérément. Comme il s'agit d'un sol rouge à chailles, dont les eaux peuvent dissoudre de la silice, il n'est pas impossible qu'il y ait contamination en silice des zones d'altération.

En 254 — Résidu faible. La silice diminue assez nettement dans l'altération, entraînant une augmentation relative du fer et de l'aluminium.

En 343 — Résidu moyen. La silice est nettement exportée. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ diminuent beaucoup, il y aurait enrichissement relatif en fer et en alumine dans la roche altérée.

237 — Résidu moyen. L'ensemble des observations et prélèvements a été effectué dans des fissures de la roche. La présence d'une croûte ferrugineuse (CF), comme cela est fréquent dans les régions sèches, semble indiquer un microclimat relativement sec. Dans la croûte ferrugineuse le fer et la silice augmentent assez fortement aux dépens de l'alumine, par contre dans l'argile calcaire (A.C.) il y a diminution relative du fer, dont les taux deviennent normaux dans l'argile rouge (A.R.).

Il semble donc que le fer, partiellement ou totalement à l'état ferreux dans la roche, peut migrer très localement et venir former une croûte qui serait également enrichie en silice par les eaux de ruissellement. Au cours de la décalcarification de la couche A.C. la silice diminue sensiblement, alors que le fer, l'aluminium et le titane se maintiennent ou augmentent relativement.

— Milieu à drainage ralenti

Il s'agit d'un milieu où l'écoulement des eaux de percola-

tion se trouve localement ralenti pour des raisons de topographie, par exemple.

— En 340 — Résidu assez important — Altération modérée. La silice diminue légèrement dans la zone altérée et corrélativement les hydroxydes augmentent.

— En Zk — Résidu important. La silice diminue assez fortement, le fer, l'aluminium et le titane augmentent nettement.

— En 215 — Résidu important — Altération profonde dans la masse. Départ modéré de silice, avec accroissement relatif en hydroxydes.

2.2.3. — Eaux de ruissellement et eaux du sol

Les eaux de pluie ont arraché et dissous des éléments dans les roches et les sols, les eaux de ruissellement les transportent à l'état solide ou dissous. Leurs analyses représentent un bilan des actions d'altération.

Bien que non négligeables les transports solides n'ont pas été étudiés. Le calcium et le magnésium dissous ont été étudiés systématiquement au cours de l'année, mais il n'en sera pas question dans cette note. Seuls la silice, le fer et l'aluminium vont être envisagés.

Dans une première série d'analyses (tableau VI) les eaux sont restées à décanter pendant 2 à 3 mois, suivant les cas. Les alcalins et alcalino-terreux sont dissous à des taux relativement élevés, la silice à des taux assez faibles, de l'ordre de quelques milligrammes par litre, suivant la saison.

Le fer et l'aluminium ne sont généralement pas décelables, même à l'état de traces.

Dans une deuxième série d'analyses (tableau VII) la décantation n'a duré que 48 heures, les taux de silice sont restés du même ordre de grandeur, mais l'aluminium a pu être dosé en quantité non négligeable. Le fer n'est apparu qu'à l'état de traces.

Pour préciser ces faibles taux d'aluminium et de fer une série d'analyses a été effectuée sur des eaux concentrées, 4 à 6 fois suivant les cas. La silice représente toujours quelques milligrammes par litre, mais le fer apparaît alors en quantité plus importante que l'alumine (la gamme utilisée pour les mesures de l'aluminium est plus sensible que celle utilisée pour le fer).

Dans un cas (eaux du Litani 10/7) l'eau a été filtrée sur filtre très fin d'une part, et laissée à décanter 48 heures d'autre part :

— *incontestablement toute la silice présente dans cette eau est sous forme dissoute, par contre l'aluminium et surtout le fer doivent être en grande partie sous forme colloïdale, puisque la moitié d' Al_2O_3 et les $3/4$ de Fe_2O_3 ont été retenus par le filtre.*

TABLEAU VI

Analyses d'eaux variées (mg/l) après une longue décantation
(2 à 3 mois)

<i>Echantillons</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>K</i>	<i>Na</i>	<i>Cl</i>	<i>SO₃</i>	<i>P₂O₅</i> (<i><1 mg</i>)
Flaque d'eau sur sol rouge	Tr.	Tr.	0	21,6	3,2	1,5	8,8	14,2	0,010	0
<i>Nahr Beyrouth</i>										
28/3/66	0,42	Tr.	0	27,2	1,2	0,6	4,6	14,2	0,010	0
7/12/66	5,95	0	0	76,0	8,6	2,0	10,0	28,4	0,003	0
12/12/66	2,15	0	0	36,8	3,6	1,5	4,7	14,2	0,012	0
<i>Grotte de Jeita</i>										
12/4/66	2,87	0	0	33,6	6,6	0,6	4,9	14,2	0,007	0
10 au 20/5/66	3,07	0	0	53,6	7,0	2,0	10,0	14,2	0,013	0
<i>Nahr el Kelb</i>										
14/4/66	0,45	0	0	23,2	8,2	0,4	2,9	14,2	0,003	0
<i>Eaux de perco- lation</i>										
Sol brun	5,50	0	0	63,2	Tr.	1,0	10,8	14,2	Tr.	0
Sol rouge	4,15	0	0	63,2	Tr.	1,8	10,8	21,3	0,010	0

III — DISCUSSION

3.1 — Les résidus non carbonatés dans la pédogénèse des sols rouges et bruns méditerranéens

L'étude des résidus de nombreuses roches carbonatées permet de tirer un certain nombre de conclusions intéressant la pédogénèse des sols rouges ou bruns méditerranéens.

La plupart des sols rouges méditerranéens formés sur roches dures carbonatées ne sont pas lithochromes. La rubéfaction est un phénomène pédologique se produisant au cours de l'altération.

Le fer donne à ces résidus leur couleur, mais les matières organiques peuvent intervenir et assombrir les teintes.

Au sein de la «gangue carbonatée» le fer peut rester à l'état ferreux, si aucune fissure ou porosité ne permet la pénétration de l'air ou des solutions du sol. La couleur de la roche est alors d'un gris bleu, plus ou moins net, suivant la quantité de fer. A la périphérie de la roche ou dans les roches plus poreuses (calcaires colithiques de Salima), la couleur devient nettement brune (10 YR).

Un matériau rouge, pétrifié, au sein d'un conglomérat, par exemple, gardera sa couleur rouge, du moins dans les milieux aérés où ils ont été prélevés et étudiés.

Ce résidu brun des roches carbonatées est très souvent constitué de silicates argileux très variés. Il faut insister ici sur la nécessité d'étudier les minéraux argileux de la roche carbonatée, avant d'étudier ceux du sol, auquel elle est supposée avoir donné naissance.

A l'observation binoculaire, certains résidus, riches en minéraux argileux, se fragmentent en petits polyèdres, après humectation par l'eau, suivant des formes semblables à celles

des éléments structuraux des sols rouges ou bruns très argileux. De là, à supposer que la structure polyédrique fine des sols rouges ou bruns méditerranéens s'organise très vite au cours ou après l'altération, il n'a a qu'un pas. Cependant des argiles de décarbonation, prélevées dans des fissures, présentent une structure médiocre, encore très éloignée de la structure des sols rouges voisins.

A ces minéraux argileux des résidus, s'ajoutent des produits ferrugineux plus ou moins amorphes, des éléments grossiers organiques et surtout siliceux. Ces éléments grossiers correspondent bien à ceux observés dans les faibles fractions sableuses des sols rouges ou bruns méditerranéens.

L'équation de Marcelin (1941) est ainsi vérifiée par ces observations :

Terres rouges = complexe détritique + complexe argileux.
Elle peut simplement être précisée :

Sols rouges ou bruns méditerranéens = complexes grossiers hérité et détritique + minéraux argileux hérités + (éventuellement) minéraux argileux néoformés et apports éoliens.

Si nous savons déjà que des minéraux argileux se transforment dans ces sols, il reste cependant à prouver qu'il peut exister des cas de néoformation en milieu calcique. Les apports éoliens lointains ou rapprochés sont une des causes de nombreux remaniements, mais ils ne doivent pas prendre une trop grande importance dans les sols rouges ou bruns des karsts méditerranéens du Liban.

Les analyses d'éléments totaux permettent d'avoir une idée assez précise de la quantité de résidus présents dans les roches carbonatées. Le résidu en pour cent de la roche est donné par la somme $\text{SiO}_2\% + \text{R}_2\text{O}_3\% + 5\%$ ($\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3$).

Ce 5% est estimé par rapport aux analyses totales faites sur les sols et correspond aux cations alcalins et alcalino-terreux présents dans les minéraux argileux.

TABLEAU VIII
Quantité de résidus des roches carbonatées

<i>Roches</i>	<i>Moyennes</i>	<i>Variations</i>	<i>Nombre d'échan- tillons</i>
Carbonates durs	1,9	0,3 à 6,0	21
Carbonates durs grossiers et poreux	5,1	2,2 à 10,9	8
Carbonates tendres	6,7	5,0 à 10,2	5
Marnes	36,4	29,9 et 42,9	2

Sans attacher une grosse importance à ces valeurs moyennes, elles montrent tout de même que les roches carbonatées contiennent autre chose que des carbonates et en quantité non négligeable.

Ces quantités de résidus non carbonatés des roches sont extrêmement variables, pouvant aller de 0,3% dans une dolomie à 11% dans un calcaire dur et beaucoup plus dans les marnes. Il en résulte une grande hétérogénéité dans l'épaisseur des sols. Sur roches dolomitiques, très abondantes dans le Liban et l'Antiliban, les sols sont réduits à leur plus simples expressions : petites poches au fond d'une profonde fissure, revêtement de quelques centimètres sur une dolomie sableuse, etc.. ces sols sont d'autant plus squelettiques que l'altération de la dolomite est relativement faible. Par contre, les calcaires ocre de l'Aptien ou les calcaires récifaux du Miocène sont recouverts de sols épais ou de poches profondes et larges.

Sur calcaires tendres et sur marnes, les sols formés pourraient être très épais, si les eaux de ruissellement n'allaient pas à l'encontre de la pédogénèse, en érodant les matériaux.

Une épaisseur moyenne de 20 cm de sol se formera relativement vite. Avec 1,3 de densité pour le sol, 2,6 pour le calcaire et un complexe hérité des roches, évalué à 75% du poids du sol, il faudra une épaisseur de :

- 4 m de calcaire dur,
- 1,5 m. de calcaire grossier,
- 1,1 m. de calcaire tendre.

Cependant, ces valeurs ne tiennent pas compte des nombreux éléments grossiers des roches, des joints de stratification, etc...

Au rythme actuel des altérations sur le versant Ouest, il faudrait 10.000 ans pour former ces 20 cm de sol sur calcaire grossier et 30 à 50.000 ans sur calcaire dur, pauvre en résidus.

Des impondérables subsistent, tels que les quantités de matériaux entraînés par les eaux et surtout les variations de l'intensité des altérations au cours des siècles.

En fait, une partie souvent importante des sols rouges et bruns méditerranéens se serait formée depuis plusieurs dizaines de milliers d'années et resterait « piégée » dans les fissures et les poches des karsts, intimement mêlée aux argiles de décarbonatation récentes.

3.2. — Comportement géochimique des éléments majeurs

Au stade actuel de nos observations et de nos expérimentations pédologiques, les quelques données analytiques présentées, doivent simplement permettre de préciser le comportement de certains éléments majeurs, au cours de l'altération des roches carbonatées.

3.2.1. — Dissolution des principaux éléments.

3.2.1.1. — Les cations basiques (Ca, Mg, K et Na) passent très facilement en solution dans le milieu naturel, en quantités variables suivant la température, les teneurs en gaz carbonique ou acides organiques des solutions du sol, la nature des minéraux (carbonates, silicates, etc...).

A la suite de très nombreuses analyses de calcaires, d'eaux et de percolats divers, il apparaît que les entraînements relatifs du calcium et du magnésium subissent des variations considérables. Mais une grande difficulté réside dans la mesure du magnésium, dont les faibles taux sont parfois de l'ordre de grandeur de l'erreur analytique.

Certaines indications semblent cependant se dégager de toutes ces données :

Les dolomies se dissolvent nettement moins bien que les calcaires, ce qui est bien connu. Mais certaines se dissolvent mieux que d'autres.

A température ordinaire, et avec de l'eau distillée, le magnésium est relativement moins exporté que le calcium (50 à 60%).

A haute température et avec de l'eau distillée, le magnésium est exporté en quantité aussi grande que le calcium.

En milieu acide* les dissolutions sont 5 à 10 fois plus importantes :

- à température ordinaire le magnésium est moins exporté que le calcium,
- à 40-45° (avec CO_2) le calcium est encore une peu plus exporté que le magnésium,
- à 90-95° (avec CO_2) le magnésium est exporté aussi rapidement que le calcium.

En fait l'action du gaz carbonique diminue avec la température, alors que la dissolution du carbonate de magnésium croît.

Les roches calcaires ont des teneurs en carbonates de magnésium parfois très faibles, il devient difficile de comparer les exportations de calcium par rapport au magnésium.

Les dissolutions varient suivant la porosité, l'hétérogénéité et la pureté en carbonates de la roche. Ainsi des roches dures, pauvres en résidus se dissolvent très lentement.

Il apparaît, d'après de nombreux résultats analytiques, que le magnésium est relativement plus exporté que le calcium, quand il existe en petite quantité dans la roche.

Dans le cas de petite quantité de magnésium dans les roches, les rapports Ca/Mg diminuent quand la température croit, phénomène observé avec les dolomies.

3.2.1.2. — Silice, aluminium et fer.

Il ne paraît pas inutile de rappeler brièvement quelques

(*) Température ordinaire : (Acide acétique 10% + Acétate d'ammonium)
pH 4,2.

lois fondamentales réglant la dynamique de la silice, de l'aluminium et du fer, dont les courbes de solubilité sont aujourd'hui bien connues.

Sur la figure 1, les solubilités de la silice (d'après Krauskoff 1956-59) et de l'alumine (d'après Wey-1962) sont représentées en fonction du pH du milieu.

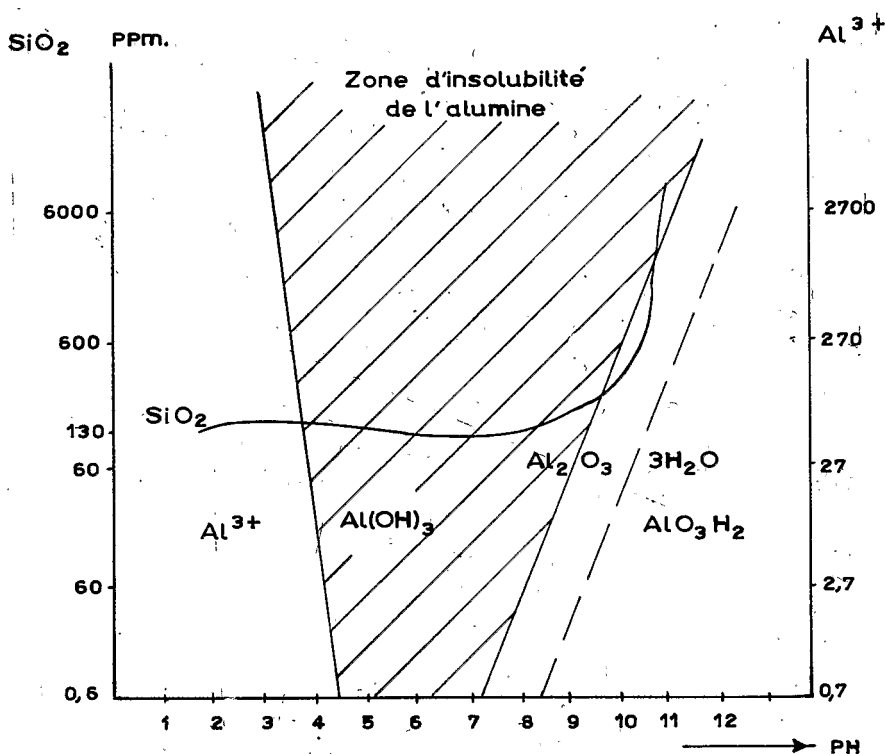


Fig. 1 — Solubilité de l'alumine (d'après Wey 1962).
Solubilité de la SiO_2 (d'après Krauskoff 1956-59)

La silice est toujours soluble, quelque soit la réaction du sol, à des taux de 120 à 140 mg/l. PEDRO (1964) apporte des précisions quant aux conditions et à l'importance de cette exportation, relativement aux autres éléments :

- le lessivage en silice serait sensiblement favorisé par un accroissement de drainage, de température et surtout par une diminution du pH des solutions d'altération et des taux de silice dans le matériau d'altération,
- la silice semble d'autant moins éliminée, en valeur relative, que les quantités exportées s'accroissent, c'est-à-dire que les autres éléments ont des taux d'exportation qui augmentent plus vite que ceux de la silice.

L'aluminium est soluble en milieu acide ($\text{pH} < 4$) et en milieu franchement basique ($\text{pH} > 12$). Aux faibles concentrations (moins de 1 mg/l.) ces limites d'insolubilité semblent assez nettement réduites : d'après Wey (1962), pour de très faibles concentrations, l'alumine ne précipiterait qu'entre pH 5 et pH 6,3.

La solubilité du fer (Charlot 1957), en fonction du pH, varie suivant son état électronique (fig. 2).

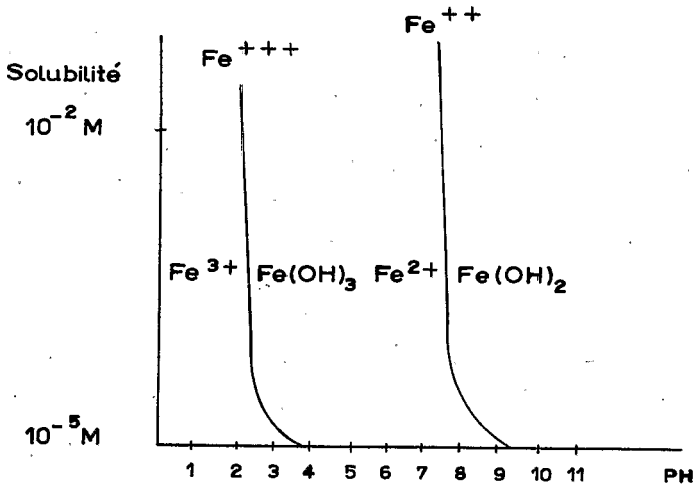


Fig. 2 — Solubilité du fer (d'après G. Charlot 1957)

Le fer ferreux est dissous à des pH inférieurs à 7,7, tandis que le fer ferrique n'est dissous qu'en milieu très acide, à des pH inférieurs à 2,2.

En fait, en milieu de plus en plus dilué (S. Hénin 1956), de faibles dissolutions se produisent en dehors de ces limites. Ainsi à pH 8 quelques millièmes de milligrammes de fer ferreux

(15 γ / l) seraient dissous, alors que le fer ferrique serait pratiquement insoluble.

Le fer ferreux n'existe qu'en milieu réducteur, dans les sols nettement hydromorphes par exemple, mais aussi dans les roches. Suivant la porosité des roches, le fer ferreux peut commencer à s'oxyder dans la zone corticale externe, le long des fissures, des lignes de clivage, etc...

Les lois fondamentales de la mise en solution de ces trois éléments majeurs présentent des conditions d'application variables suivant les milieux d'altération, ce que Pédro (1964) a précisé dans le cas de l'altération expérimentale des roches cristallines.

Les interactions entre les différents cations sont encore assez mal connues. G. Millot (1964) cite les travaux d'Okamoto et de ses collaborateurs (1957) signalant que 20 ppm d' Al^{3+} réduisent la solubilité de la silice à 15 ppm dans la marge des pH de 8 à 9. Wey et Siffert (1961) ont montré que le magnésium diminuait considérablement la solubilité de la silice et de l'aluminium.

Bien d'autres cations peuvent également interférer, ainsi que la concentration des différents sels dans les solutions du sol.

La formation de complexes favorise des migrations qui ne se feraient pas dans les conditions habituelles de pH. Ainsi une partie des hydroxydes des sols rouges ou bruns méditerranéens semble très fortement liée à un produit noir que la calcination seule peut éliminer. Il s'agit probablement de complexes organo-ferriques, observés parfois à plus de 1 mètre de profondeur.

Enfin, il est important de noter que les faibles concentrations de l'élément considéré favorisent sa mise en solution.

La silice (fig. 1) est soluble, quel que soit le pH, à des concentrations non négligeables de 120 à 140 mg/l, mais variables suivant le milieu. Wey (1962) a montré que l'aluminium était insoluble entre des marges de pH de plus réduites quand sa concentration diminuait. Enfin HENIN (1956) a montré que seul le fer ferreux pouvait, aux très faibles concentrations, être dissous (quelques γ) entre pH 7 et 9.

3.2.2. — Dynamique de la silice, du fer et de l'aluminium au cours de l'altération des roches carbonatées.

Toutes réserves étant formulées (chap. 2.2.2.), quant à l'interprétation de la dynamique des différents éléments au cours de l'altération des roches carbonatées, un certain nombre d'observations peuvent être faites.

3.2.2.1. — La silice apparaît constamment dans les eaux de ruissellement ou dans les solutions du sol, aux taux relativement faibles, de quelques milligrammes par litre. Si dans les produits d'altération les rapports moléculaires mettent très souvent en évidence cette exportation, dans certains cas (308-237, etc..) il y aurait enrichissement relatif en silice.

L'hypothèse d'une contamination par les eaux du sol a été émise plus haut. Il n'est cependant pas possible d'écarter, dans le cas des calcaires, une autre hypothèse⁽¹⁾ exposée dans une note récente (Lamouroux-1968) :

Jusqu'à la valeur 3 du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de la roche, la silice serait l'élément le moins entraîné, l'aluminium le plus fortement. Au-delà de la valeur 3 de ce rapport, la silice serait nettement entraînée, tandis que le fer, l'aluminium et le titane seraient immobilisés sur place. Cette hypothèse, déduite d'une douzaine d'exemples étudiés, paraît assez logique, du fait qu'aux faibles valeurs de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ la silice serait engagée dans des réseaux silicatés, du moins en quantités relativement plus grandes que l'alumine. Au-delà de la valeur 3 du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ la silice serait en quantité excédentaire par rapport à l'alumine, donc à l'état cristallin ou amorphe et de ce fait plus facilement dissoute et entraînée.

3.2.2.2. — L'aluminium n'a théoriquement pas le même comportement que la silice, vis à vis des solutions des sols considérés ici. Aux pH habituels du sol il ne devrait pas être entraîné, or il apparaît très régulièrement dans les analyses d'eaux, à de faibles taux il est vrai. Les résines d'un déminéralisateur ont retenu, après passage de quelques dizaines de litres d'eau, 68 mg/l de silice et 1 mg/l d'alumine, ce qui reste négligeable.

(1) Il s'agit plus d'une constatation que d'une hypothèse, assez difficile à fonder.

Les essais de décantation prolongée prouveraient une absence totale de fer et d'aluminium à l'état dissous dans les eaux, par contre ces éléments existeraient sous forme de produits colloïdaux très fins, à l'état de complexes plus ou moins stables.

Des analyses de stalagmites et de stalactites, de formation relativement récente, ne mettent en évidence aucune trace d'aluminium et de fer, ce qui vérifie cette hypothèse.

Les filtres, même très fins, ne retiendraient pas la totalité de ces colloïdes.

3.2.2.3. — Le fer, à l'état ferrique dans les sols étudiés, ne doit absolument pas migrer en solution.

Par contre, il existe à l'état ferreux dans les roches carbonatées et peut migrer, en très faible quantité, soit vers une zone corticale, soit à l'extérieur de la roche, zone où l'oxydation est très rapide et bloque le fer ferrique, en auréole à l'intérieur ou sous forme de croûte à l'extérieur de la roche. Ce déplacement du fer ferreux a pu être reproduit expérimentalement.

D'une façon générale, dans les produits d'altération, le fer augmente en valeur relative. Dans quelques rares cas il semble diminuer, mais il peut s'agir, soit d'une diminution relative due à un enrichissement localisé en silice, soit d'une hétérogénéité de la roche.

Dans les eaux le fer apparaît, comme l'aluminium, en quantités relativement faibles et peut-être plus que pour l'aluminium l'état de cet élément est colloïdal, comme le montrent les décantations et les filtrations. Aucune relation ne semble lier le fer à la silice, en effet les filtres retiennent une grande partie du fer en laissant les taux de silice inchangés.

Par contre, les complexes organo-ferriques pourraient jouer un rôle important dans les milieux étudiés :

- en lame mince, à l'observation microscopique, des amas nodulaires, brun-foncé à noir, bien répartis dans le plasma, mettent en évidence une association matière organique — fer,

- au laboratoire, certaines analyses colorimétriques d'échantillons de profondeur sont souvent troublées par un composé brun, détruit uniquement par calcination.

IV — CONCLUSION

Les sols rouges ou bruns méditerranéens présentent une fraction fine abondante (60 à 80%) de composition chimique constante, du moins sur roche-mère carbonatée, basaltique ou argileuse. Il a été montré (M. Lamouroux, H. Paquet, M. Pinta et G. Millot — 1968) que, dans 80% des cas, les éléments montmorillonitiques dominaient et se trouvaient en quantité moyenne, relativement à la masse colloïdale.

Autour d'une composition chimique voisine de la suivante (SiO_2 : 40% — Al_2O_3 : 25% — Fe_2O_3 : 14%) quelques variations sont notées, quand la kaolinite domine par exemple ou quand ces minéraux silicatés sont très peu, ou au contraire, très abondants.

Dans les roches calcaires ou dolomitiques, les résidus non carbonatés existent en quantité variable, presque entièrement à l'état colloïdal, sous formes amorphes ou cristallisées. Avec toutes les restrictions que comporte l'interprétation et en ne tenant compte que des échantillons contenant 3% ou plus de résidus non carbonatés, il semble que les compositions chimiques (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) de ces résidus soient assez voisines de celles des sols correspondants.

Dans le milieu humide ou subhumide du Liban, les mises en solution des bases alcalines et alcalino-terreuses des roches carbonatées sont faciles à suivre, mais les transformations éventuelles que subissent les résidus plus ou moins silicatés de ces roches, avant de devenir le sol que nous connaissons, sont difficiles à mettre en évidence.

En effet :

- les stades intermédiaires de l'altération sont souvent réduits ou inexistantes,
- les quantités de résidus sont souvent faibles pour donner lieu à une interprétation géochimique, hétérogénéités, remaniements, pédogénèses passées,

etc... contribuent à «brouiller les cartes» et à rendre inextricable le problème.

Par ailleurs, les eaux de percolation ou de ruissellement ne dissolvent que des quantités relativement faibles de silice. Mais cette dissolution est tout de même suffisante pour expliquer que dans les sols rouges ou bruns méditerranéens du Liban, il ne semble pas exister de silice amorphe (méthode Ségalen 1966). Ce point de vue global reflète assez bien ce que l'on peut attendre d'une pédogénèse, en milieu saturé, sous climat méditerranéen.

Cependant localement, comme nous l'avons vu au chapitre 2.2.1, il semble y avoir des «réajustements quantitatifs» au cours des altérations entre les résidus non carbonatés et les éléments du sol. La lenteur et la faible importance de ces «réajustements» influeraient très peu sur le bilan global, tel qu'il peut être fait en traitant des eaux de ruissellement ou de percolation.

V — RÉSUMÉ

Une étude des résidus, non calcaires, des roches carbonatées du Liban a mis en évidence :

- la couleur généralement brune de ces résidus, la présence de minéraux argileux plus ou moins cristallisés, leur hétérogénéité dans une même série ou dans une même stratification.

Les analyses de roches carbonatées et de leurs produits d'altération permettent d'avoir une bonne idée de la composition des éléments dont le sol hérite. Mais il est très difficile de suivre une évolution géochimique avec des taux d'éléments de 1 à 0,1% de la prise d'échantillon.

Les eaux de ruissellement et de percolation permettent cependant d'avoir une idée globale des entraînements par dissolution :

- alcalins et alcalino terreux, en forte quantité,
- silice, à des taux minimes de 2 à 8 mg/l,
- alumine et fer, à l'état de traces.

SUMMARY

A study of non calcareous residues of carbonated rocks in Lebanon has indicated the following:

- the color of these residues is generally brown,
- their mineralogical nature is often clay,
- their heterogeneity in the same serie or stratification is noticeable.

Analysis of carbonated rocks and of their alteration products give good idea of the elementary composition of future soils. However it is very difficult to follow a geochemical evolution with an element content lower than 1 — 0,1%.

Run-off and percolation water analysis give however a general idea of the exported elements:

- alkaline and alkalino-earth in high amounts,
- silica, in low amounts of 2-3 mg/l,
- aluminim and iron in trace amounts.

VI — BIBLIOGRAPHIE

- Charlot, G. 1957. — L'analyse qualitative et les réactions en solution — Masson, Paris, 365 p.
- Henin, S. 1956. — Quelques oxydes et hydroxydes considérés du point de vue pédologique — Bull. gr. Fr. Argiles, 8, 1-10.
- Krauskoff, K.B. 1959. — Geochemistry of silica. Soc. Econ. Paleont. Miss. Publ. n° 7, 4-19.
- Lamouroux, M. 1965. — Observation sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide (Liban) Cah. ORSTOM, série Pédol. III, 1, pp. 21-41.
- Lamouroux, M. 1966. — A propos de la formation des sols rouges méditerranéens, sous le climat humide du Liban. Conf. de Madrid — Sept. 1966.
- Lamouroux, M. & G. Aubert. 1966. — Les sols bruns méditerranéens formés sur calcaires durs au Liban. Conf. de Madrid — Sept. 1966.
- Lamouroux, M., M. Paquet, M. Pinta & G. Millot. 1968. — Note préliminaire sur les minéraux argileux des altérations et des sols méditerranéens du Liban — A paraître dans Bulletin Serv. de la carte géologique d'Alsace-Lorraine.
- Marcelin, P. 1941. — Terres et sols rouges des régions calcaires du Gard et du Vaucluse. Bull. Soc. Etude Sc. Nat. de Vaucluse — Avignon.
- Millot, G. 1964. — La géologie des argiles — Masson, Paris, 499 p.
- Okamoto, G., T. Okura & K. Goto. 1957. — Properties of silica in water — Géochim. Cosmoch. Acta, 12, p. 123-132.
- Pedro, G. 1964. — Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines — Thèse Sc. INRA, Paris, 345 p.
- Rodier, J. — L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau Dunod — Paris 1966 — pp. 412.
- Wey, R. 1962. — dans Millot, G. — 1964.
- Wey, R., SIFFERT (B.p. 1961) Réactions de la silice monomoléculaire en solution avec les ions Al^{3+} et Mg^{3+} — Génèse et synthèse des argiles — Coll. Intern. CNRS, 105, pp. 11-23.

TABLEAU IV

Analyse chimique de quelques roches carbonatées.

Echantillons	Sol formé*	Perte au feu	Résidu non carbonaté	SiO ₂	R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TOTAL	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si ₂ O ₇ / Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃	SiO ₂ % N. C.	Al ₂ O ₃ % N. C.	Fe ₂ O ₃ % N. C.
1 — Calcaires durs, fins																					
48-Zaoutar	S.R.M.	43,81	0,94	0,48	0,42	0,39	tr.	0	0,03	tr.	55,16	0,51	tr.	0,51	100,91	2,4	—	—	51,0	41,5	—
49-Imnsar	S.R.M.	44,48	0,81	0,07	0,70	0,62	0,08	0	0,00	tr.	51,64	3,56	0,01	0,43	100,89	0,2	2,3	11,5	8,6	76,5	9,9
73B-Ejmeh	S.R.M.	43,14	2,89	0,58	2,17	1,35	0,32	0	0,50	tr.	53,98	1,01	0,14	0,81	100,71	0,7	4,8	6,8	20,0	46,5	11,0
84-Masser Choûf	S.B.M.	42,69	3,15	1,10	1,90	1,21	0,29	0	0,40	0	52,57	1,01	0,21	0,81	99,67	1,5	10,1	6,7	35,0	38,4	9,2
344-Aintoura	S.B.M.	43,67	2,57	2,30	0,15	tr.	0,14	0	0,00	0	54,68	0,76	0,05	0,72	100,33	—	43,5	0	89,5	—	5,4
2 — Dolomies																					
315-Djezzine	S.R.M.	46,43	1,36	0,48	0,82	0,82	tr.	0	tr.	0	33,65	18,14	0,04	0,37	99,84	1,0	—	—	35,4	60,4	—
295-Kartaba	S.R.M.	48,11	0,26	tr.	0,25	0,25	tr.	0	0	0	31,19	20,66	0,00	0,33	100,29	—	—	—	—	96,0	—
342-Kamoua	S.R.M.	46,75	4,11	2,35	1,57	1,42	0,15	tr.	0	0	32,59	17,14	0,12	0,40	99,92	2,8	41,7	14,9	57,0	34,5	3,6
Cd. Sfarey	S.R.M.	45,72	2,38	0,47	1,80	1,24	0,41	0,05	0,10	tr.	34,29	17,65	0,01	0,46	100,40	0,6	3,0	5,1	19,8	52,0	17,2
3 — Calcaires durs, grossiers																					
73 j. Ejmeh	S.R.M.	40,59	10,97	4,40	6,05	2,30	3,58	0,10	0,04	0,03	47,39	2,04	0,03	0,37	100,87	3,2	3,3	1,0	40,0	21,0	32,7
76 id.	S.B.M.	41,66	7,02	2,32	4,37	1,39	2,50	tr.	0,48	tr.	50,47	1,01	0,07	0,81	100,34	2,8	2,5	0,9	33,0	19,8	35,6
247-Bhannès	S.B.M.	42,55	3,43	1,00	2,27	0,83	0,95	0	0,49	0	51,28	2,52	0,10	0,81	100,50	2,0	2,8	1,4	29,2	24,2	27,7
20-Baabdat	S.B.M.	43,05	2,54	1,15	1,27	0,44	0,78	tr.	0,05	tr.	51,87	1,25	0,04	0,67	99,30	4,4	3,9	0,9	45,2	17,3	30,7
4 — Calcaires tendres et marnes																					
46-Sarafand	S.B. vertique	41,72	5,06	3,45	1,37	0,70	0,49	0	0,18	tr.	51,64	1,27	0,05	0,47	99,97	8,3	18,7	2,2	68,0	13,8	9,7
220-Babliyé	S. noir vertique	41,06	6,00	3,60	2,12	0,99	0,55	0	0,58	0	50,47	1,51	0,10	0,81	99,67	6,2	17,4	2,8	60,0	16,5	9,1
Cm. Sarafand	S.B. vertique	41,46	5,07	2,98	1,85	0,84	0,37	0,07	0,57	0	51,98	0,52	0,05	0,54	99,58	6,0	21,4	3,6	58,8	16,6	7,3
33-Salhyé	Rendzine	27,06	42,89	33,75	7,10	3,93	2,22	0,25	0,70	tr.	27,00	4,55	0,29	0,41	100,16	14,6	40,3	2,75	79,0	9,15	5,2

* S.R.M. = sol rouge méditerranéen.

S.B.M. = sol brun méditerranéen.

** Résidu non carbonaté (N.C.) = (SiO₂% + R₂O₃%) + 5% de cette somme.

TABLEAU V

Analyses chimiques de roches carbonatées et de leurs produits d'altération.

Echantillons	Age géologique	Localisation (pluie en mm)	Sol	Drainage	Perte au feu	Résidu non carbonaté	SiO ₂	R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TOTAL	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si ₂ O ₇ / Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃	SiO ₂ % N. C.	Al ₂ O ₃ % N. C.	Fe ₂ O ₃ % N. C.	
308	RS	Eocène	Zaoutar (850)	SRM à chailles	Bon drainage	42,57	1,31	0,25	1,00	0,55	0,15	0,10	0,20	0	54,60	0,25	0,32	0,55	99,61	0,7	4,3	6,1	19,1	42,0	11,4
	RA				42,50	3,78	1,30	2,30	1,46	0,36	0,20	0,27	0	52,85	0,25	0,16	0,54	99,95	1,4	9,1	6,5	34,3	38,6	9,5	
340	RS	Cénomanién	Masser Chouff (1200)	SBM	Drainage ralenti	40,90	5,92	4,44	1,22	0,47	0,45	0,12	0,16	0	50,12	1,00	0,50	0,67	98,30	16,1	26,4	1,6	75,0	8,0	7,6
	RA				40,22	7,73	5,36	2,00	1,07	0,68	0,15	0,10	0	49,42	0,76	0,55	0,64	98,95	13,3	21,2	1,6	69,4	13,8	8,8	
343	RS	Jurassique	Aintoura (1250)	SRM	Bien drainé	39,85	5,06	1,70	3,12	2,25	0,82	tr.	0,05	tr.	51,62	1,87	0,04	0,55	99,76	1,28	5,51	4,30	33,5	44,4	16,2
	RA				38,30	9,37	1,80	7,13	5,47	1,60	tr.	0,06	0,0	50,75	1,25	0,10	0,55	99,88	0,56	2,90	5,36	19,2	58,4	17,1	
237	RS	Cénomanién	Meissej Jebel (750)	Roche Croûte ferrug. A. calcaire A. rouge	Bien drainé	42,87	2,52	0,90	1,50	1,16	0,24	0,10	0	0	53,90	0	—	0,70	99,05	1,3	7,5	5,8	35,7	46,0	9,5
	CF				35,95	19,80	11,55	7,40	3,83	3,03	0,34	0,20	tr.	41,01	1,76	0,48	0,60	98,68	5,2	10,2	1,9	58,3	19,3	15,3	
	AC				25,64	45,15	26,00	17,00	13,25	3,10	0,60	0,05	tr.	28,00	2,00	—	0,90	98,64	3,3	22,3	6,7	57,5	29,2	6,8	
	AR				11,40	85,30	41,14	40,10	26,32	11,66	1,60	0,4	0,03	3,15	1,00	1,24	0,50	99,53	2,6	9,4	3,6	48,3	30,8	13,7	
118	RS	Cénomanién	Kfaroua	Roche A. rouge	Bien drainé	46,62	1,14	0,94	0,15	0,11	tr.	0	0,04	0	34,47	18,18	0,04	0,36	100,76	14,5	—	—	82,5	9,6	—
	AR				31,87	37,85	18,30	17,75	10,41	6,73	0,45	0,15	0,01	26,02	5,85	0,04	0,36	100,19	2,9	7,2	2,5	48,2	27,5	17,8	
Zk	RS	Miocène	Zouk (875)	Roche Altération A. rouge	Drainage ralenti	41,18	4,83	3,60	1,00	0,45	0,30	0,25	0	tr.	52,5	tr.	0,80	0,55	99,63	13,6	31,6	2,3	74,5	9,3	6,2
	AI				37,60	16,20	10,95	4,50	2,99	1,23	0,23	0,05	tr.	45,5	0,75	0,10	0,45	99,85	6,2	23,6	3,8	67,5	18,5	7,6	
	AR				12,20	83,07	46,70	32,42	18,25	12,98	1,07	0,12	tr.	6,12	1,87	0,56	0,10	99,97	4,34	9,55	2,2	56,2	22,0	15,6	
215	RS	Eocène (C. tendre)	Sarafand (700)	Roche R. altérée S. brun cal.	Drainage ralenti	39,80	10,24	7,00	2,75	1,67	0,75	0,15	0,18	0	49,00	0,50	0,26	0,57	98,58	7,1	24,6	3,5	68,3	16,3	7,3
	AR				36,77	17,77	11,53	5,40	3,29	1,66	0,27	0,18	tr.	44,10	0,75	0,26	0,51	100,33	5,9	18,5	3,1	65,0	18,5	9,3	
	AR				24,48	49,25	27,92	18,98	12,65	5,72	0,60	tr.	0,01	25,21	0,97	0,30	0,34	98,20	3,7	13,0	3,5	56,5	25,7	11,6	
254	RS	Miocène	Saïda (700)	Roche R. altérée	Bien drainé	43,12	0,87	0,53	0,30	0,10	0,15	0	0,05	0	54,33	0,75	0,02	0,65	99,7	9,0	9,4	1,0	61,0	11,5	17,2
	RA				42,18	1,49	0,70	0,72	0,26	0,40	0	0,06	0	53,62	0,50	0,02	0,66	99,2	3,6	4,6	1,3	47,0	17,5	26,9	