

INDIVIDUALISATION ET ACCUMULATION DU CALCAIRE DANS LES SOLS ET LES DÉPÔTS QUATERNAIRES DU MAROC

par

Alain RUELLAN *

RÉSUMÉ

Au Maroc, les sols isohumiques subtropicaux et les sols rouges méditerranéens présentent toujours un horizon d'accumulation du calcaire qui, selon la nouvelle nomenclature que nous proposons, peut être :

- *une accumulation diffuse avec ou sans pseudo-mycélium,*
- *un horizon à amas friables,*
- *un horizon à concrétions : granules, nodules,*
- *une carapace constituée d'un encroûtement parfois coiffé d'une pellicule rubanée,*
- *une carapace comprenant une croûte qui passe en profondeur à un encroûtement, la croûte pouvant être surmontée d'une pellicule rubanée ou d'une dalle compacte.*

Les accumulations de calcaire sont le résultat, plus ou moins accentué, d'un même processus pédologique, processus très lent d'accumulation en profondeur (à partir de 40-60 cm en moyenne) autour d'un système racinaire, le calcaire ne provenant ni du lessivage des horizons supérieurs, ni de la roche-mère, mais d'apports obliques par le ruissellement superficiel, par une circulation diffuse dans le sol et par les nappes phréatiques.

SUMMARY

In Morocco, the isohumic subtropical soils and red mediterranean soils are always showing a horizon of limestone accumulation which, according to the new nomenclature submitted by ourselves, can be :

- *a diffused accumulation with or without pseudo mycelium,*
- *a horizon with brittle piles,*
- *a horizon with concretions : granules, nodules,*
- *a hardpan made up by an incrustment, sometimes caped with a ribboned film,*
- *a hardpan comprising a crust, which with depth, becomes an incrustment ; the crust might be surmounted either by ribboned film, or a compact slab.*

The limestone accumulation are a more or less emphasized result of the same pedological process. It is a very slow process of accumulation in depth (average of 40 to 60 cm) around a radicular system, the limestone not being issued neither from vertical leaching of the surface horizons, nor from the parent rock, but from leaching of side deposits and transport by surface runoff, diffused circulation in the soil and phreatic sheets.

(*) Pédologue, Maître de Recherches O.R.S.T.O.M. Direction de la Mise en Valeur. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire. RABAT-MAROC.

PLAN

- I - Rappel des hypothèses déjà proposées
 - A. Les principales hypothèses
 - B. Les travaux de G. AUBERT
 - C. Les travaux de J.H. DURAND
 - D. Les travaux de J. BOULAINÉ
 - E. Les travaux de J. WILBERT
- II - Description des formes d'individualisation et d'accumulation du calcaire
 - A. Les accumulations diffuses
 - B. Les amas friables
 - C. Les granules et nodules
 - D. Les encroûtements
 - E. Les croûtes
 - F. La dalle compacte
 - G. La pellicule rubanée
 - H. Les carapaces calcaires
- III - Les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts
 - A. L'individualisation et l'accumulation du calcaire dans les dépôts quaternaires
 - B. L'individualisation et l'accumulation du calcaire dans les sols
 - 1. Position et épaisseur des horizons
 - 2. Rapports entre les horizons superficiels et les accumulations de calcaire
 - 3. Rapports entre les accumulations de calcaire et les roches-mères
 - 4. Corrélations verticales entre les divers horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire
 - 5. Corrélations latérales entre les divers horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire
 - 6. Les individualisations et accumulations du calcaire en fonction de l'âge des sols et des climats actuels
 - 7. Les individualisations et accumulations du calcaire en fonction du relief et du microrelief
 - 8. Observations diverses
- IV - Essai d'interprétation de la formation des individualisations et accumulations de calcaire dans les sols et les dépôts
 - A. Formation dans les dépôts quaternaires
 - B. Formation dans les sols (sols isohumiques et sols rouges)

Conclusion

Bibliographie

Dans les sols méditerranéens, le calcaire est très souvent un élément fondamental de description et de classification : c'est en grande partie d'après sa présence ou son absence dans un ou plusieurs horizons, d'après sa répartition verticale dans un profil, ou horizontale dans une chaîne de sols, d'après les formes sous lesquelles il peut apparaître, que l'on classe bien des sols et que l'on émet des hypothèses sur leurs formations.

Aussi, l'accumulation du calcaire dans les sols méditerranéens et plus particulièrement la formation des carapaces calcaires qui sont si fréquentes, a-t-elle déjà fait, et continue à faire, l'objet de nombreuses études et de nombreuses discussions. La bibliographie que nous connaissons, essentiellement française et nord-africaine, contient déjà beaucoup d'observations de terrain et de laboratoire, des descriptions plus ou moins détaillées des diverses formes d'accumulation de calcaire, des nomenclatures très diverses, des théories très variées.

Tout au cours de notre travail au Maroc depuis 8 ans, il nous est cependant progressivement apparu qu'une grande partie de cette bibliographie cadrerait souvent difficilement avec nos propres observations : ce sont ces observations et les conclusions qu'il nous semble possible d'en tirer qui feront l'objet de cet article.

Ce n'est pas, cependant, l'ensemble des accumulations de calcaire présentes dans les sols et les dépôts du Maroc qui est abordé ici : nous n'avons pas la prétention de toutes les connaître. Mais c'est seulement de celles qui sont associées soit à des sols dits isohumiques (sols bruns et sols châtain), soit à des sols rouges méditerranéens, soit à des sols qui en dérivent (sols bruns calcaires, rendzines, sols bruns méditerranéens) que nous aurons à parler, l'ensemble de ces sols couvrant au Maroc de très vastes surfaces. Par ailleurs, si à plusieurs reprises nous avons pu contrôler à travers le Maroc la validité de nos hypothèses, il faut préciser que l'essentiel de notre travail a été réalisé dans les régions semi-arides et arides du Nord-Est du Maroc, surtout en Basse Moulouya (plaines des Triffa et du Zebra).

Nous nous proposons donc dans cet article :

- 1° De rappeler les principales hypothèses déjà avancées par nos prédécesseurs.
- 2° De définir une nouvelle terminologie des individualisations et accumulations du calcaire qui nous semble mieux adaptée à la plupart des sols et des dépôts quaternaires du Maroc.
- 3° De décrire sommairement les principaux faits qui nous ont permis d'élaborer un certain nombre d'hypothèses sur les modes de formation de ces accumulations de calcaire.
- 4° De proposer ces nouvelles hypothèses. Nous verrons qu'elles ont des caractères essentiellement pédologiques, et nous montrerons que, dans les sols que nous avons étudiés, les différents types d'individualisation et d'accumulation du calcaire sont les résultats d'une même famille de processus. Mais ceci ne voudra pas dire qu'il n'existe pas au Maroc des accumulations de calcaire qui ont d'autres origines : il y a certainement des encroûtements de nappe, des encroûtements et des dalles calcaires très étendues d'origine lacustre comme ceux du Saïs et du Tadla, des dépôts localisés de boues calcaires, des formations travertineuses comme celles qui bordent tout le piedmont du Causse Moyen-Atlasique (mises en évidence récemment par G. BEAUDET et J. MARTIN), des dépôts de ruissellement, probablement assez rares. Ces formations présentent d'ailleurs le plus souvent les mêmes faciès que les accumulations que nous croyons d'origine pédologique et c'est généralement l'étude géomorphologique et géologique qui permet de les distinguer : l'erreur qu'il faut d'ailleurs à notre avis éviter, est d'attacher trop d'importance aux faciès, de vouloir imaginer autant de modes de formation qu'il y a de faciès. En réalité, nous pensons qu'un même faciès peut être le résultat de processus très différents et qu'un même processus peut donner naissance à des faciès très variés.

1 - RAPPEL DES HYPOTHÈSES DÉJÀ PROPOSÉES

Il serait trop long, dans le cadre de cet article, de détailler toute la bibliographie qui est déjà parue sur ce sujet de l'accumulation du calcaire dans les sols méditerranéens (on peut à ce sujet se reporter aux diverses mises au point faites par J.H. DURAND). Seules les principales théories en présence seront rappelées. Nous nous arrêterons cependant plus longuement sur les travaux de quatre chercheurs qui se sont plus particulièrement intéressés à ces problèmes : G. AUBERT, J.H. DURAND, J. BOULAINÉ et J. WILBERT.

A - Les principales hypothèses

Comme l'avait fait J. BOULAINÉ (1957), il est tout d'abord bon de rappeler que la plupart des auteurs sont d'accord sur un certain nombre de faits qui sont les suivants :

- L'accumulation du calcaire dans les sols et les carapaces calcaires ne sont pas des phénomènes limités. On les retrouve dans de nombreuses régions et sur de grandes surfaces.

- Il y a une certaine distribution climatique des carapaces calcaires qui semblent localisées dans les régions à climat méditerranéen et surtout dans l'aride et le semi-aride.

- Les faciès des accumulations du calcaire sont variés.

- Leur épaisseur peut être assez grande et elles sont généralement situées à proximité de la surface du sol.

- Certains faciès sont pauvres en débris clastiques.

- Les carapaces calcaires sont le plus souvent anciennes : la plupart datent au moins du Tyrrhénien (Tensiftien du Maroc) et beaucoup se sont formées au Villafranchien.

- Une seule théorie, un seul processus, ne peuvent expliquer tous les cas possibles d'individualisation et d'accumulation du calcaire.

Sans parler des quatre auteurs cités plus haut, les théories qui ont été jusqu'à présent proposées, sont les suivantes :

- Les carapaces calcaires sont dues à un phénomène de remontée capillaire, généralement à partir d'une nappe phréatique. Cette hypothèse, avec toutes sortes de variantes quant aux mécanismes du processus, a été soutenue par A. POMEL (1889), L. PERVINQUIERES (1903), V. AGAFONOFF (1935-1936) qui admet également les apports latéraux, J. FLANDRIN, M. GAUTHIER et R. LAFFITE (1948) pour qui la partie supérieure de la carapace a été ensuite remaniée par la pluie, M. DALLONI (1951), J. BRICHETEAU (1951).

- Les carapaces calcaires sont des dépôts de sources. Cette hypothèse proposée par FRAAS en 1865, a été reprise par G. GAUCHER en 1947 et 1948. D'ailleurs pour cet auteur (1959-1960) seuls les encroûtements auraient une origine hydrologique et non pédologique, mais il ne précise pas très bien ce qu'il veut dire par "origine hydrologique".

- Les carapaces calcaires, plus précisément ce que nous définirons comme des croûtes et des dalles sont le résultat d'un ruissellement superficiel en nappe d'une eau chargée en calcaire ; cette eau dépose son calcaire par évaporation du gaz carbonique et évaporation. Cette théorie, proposée pour la première fois par D. JARANOFF (1936 et 1937) a été détaillée par J.H. DURAND (voir § 1 C). Elle a été très largement admise au Maroc, en particulier par les géomorphologues et les géologues (voir à ce sujet J. MARGAT, R. RAYNAL et P. TALTASSE, 1954 et R. RAYNAL, 1961) pour qui la croûte calcaire est un élément caractéristique des dépôts morphologiques quaternaires, éléments mis en place par ruissellement superficiel à la fin des pluviaux.

- Certains encroûtements et dalles calcaires sont des dépôts lacustres. Nous en reparlerons à propos des travaux de J.H. DURAND, J. BOULAIN et J. WILBERT. Cette hypothèse a également été défendue par H. ROSEAU (1947).

- Dans les zones arides, L.H. GILE, F.F. PETERSON et R.B. GROSSMAN (1966) pensent que le calcaire est apporté par le vent sous forme de poussières et qu'il est ensuite lessivé et accumulé en profondeur par les pluies. Ceci expliquerait que des accumulations importantes de calcaire puissent se développer dans des roches-mères non calcaires.

- Enfin, beaucoup d'auteurs voient dans l'accumulation du calcaire, dans la formation de certaines ou de toutes les carapaces, le résultat d'une évolution essentiellement pédologique par lessivage des horizons supérieurs, remontée des solutions du sol à certaines époques, et accumulation du calcaire à un certain niveau sous l'action des variations de perméabilité, ou par évaporation, la vie microbienne des sols et le système racinaire des plantes étant grandement responsables de ces phénomènes de lessivage, remontée et accumulation. Ces hypothèses ont été défendues par BLAKENHORN, DRANITZINE (1913) ; L. YANKOVITCH (1935-1936) ; J. BRICHETEAU (1951) ; A.R.V. AVELLANO (1953) ; M. GIGOUT (1958 et 1960) pour qui cependant, le durcissement de la croûte et son feuilletage sont des phénomènes postérieurs à l'accumulation pédologique du calcaire, phénomènes de circulation interne et de ruissellement superficiel après décapage des horizons supérieurs lessivés en calcaire ; G. GAUCHER (1959-1960) pour qui, seule la croûte

"zonaire" est un horizon pédologique d'accumulation, un "orstein" ; D.M. STUART, M.A. FOSBERG et G.C. LEWIS (1961) ; N. FEDOROFF (1961) pour qui les accumulations de calcaire sont liées à la formation des sols rouges méditerranéens, et qui voit dans la croûte "zonaire" un phénomène postérieur de remaniement à l'air libre ou dans le sol ; P. HUVELIN (1965) qui adopte les hypothèses de G. GAUCHER et J. BOULAIN.

B - Les travaux de G. AUBERT

D'une façon générale, G. AUBERT (1) admet que l'origine des carapaces calcaires peut être très variée. Certaines peuvent être des dépôts de lacs ou de marécages, d'autres des dépôts de nappes phréatiques ou de sources. Il admet même que le ruissellement a pu jouer localement pour former la partie durcie tout à fait superficielle de certaines croûtes. Cependant, étant donné la morphologie des carapaces, leurs positions topographiques, leur situation climatique et leurs relations avec les sols isohumiques subtropicaux, il estime que ces hypothèses ne peuvent s'appliquer qu'à certains cas assez particuliers.

D'autre part, vu la proximité des carapaces de la surface actuelle du sol, G. AUBERT pense également que le seul lessivage vertical du calcaire ne peut expliquer la formation de ces accumulations qui sont souvent si puissantes ; il faudrait admettre que des épaisseurs importantes d'horizons supérieurs appauvris en calcaire ont aujourd'hui disparu par érosion (érosion très régulière puisque la profondeur des carapaces est très constante).

En définitive, G. AUBERT pense que la majorité des accumulations et des carapaces de calcaire, du moins celles qui sont associées aux sols isohumiques, "sont dues à un double processus, très longtemps prolongé, de lessivage des horizons de surface d'un sol généralement steppique et de remontée capillaire aux dépens de nappes temporaires, ou plus exactement de zones d'engorgement constituées, en profondeur, par des venues latérales d'eaux ou par la pénétration en profondeur d'eaux de pluie lors des périodes très pluvieuses qui se produisent si irrégulièrement en ces régions. Ces deux processus, activés d'ailleurs par l'effet du système racinaire de la végétation, peuvent, siècle après siècle, donner naissance aux bancs calcaires friables prolongés à leur base par les horizons riches en amas calcaires, si souvent observés. Le durcissement superficiel, si caractéristique de ces croûtes, et que nous avons toujours observé comme intimement lié à la masse friable, ne paraît alors dû qu'à une action secondaire d'humidification temporaire de la partie supérieure de cette masse et au redépôt par évaporation des éléments calcaires" (1960).

C - Les travaux de J. H. DURAND

Depuis 1953 les publications de J.H. DURAND sur les croûtes calcaires sont assez nombreuses, et, dans l'ensemble, il est resté fidèle aux hypothèses qu'il présenta dès le début.

J.H. DURAND distingue 6 types de "croûtes" calcaires.

1° Les formations pulvérulentes qui semblent être ce que nous définirons plus loin comme encroûtement tuffeux. Très riches en calcaire (plus de 80 %), ces formations peuvent être très épaisses (jusqu'à 30 m) et seraient très pauvres en éléments clastiques. Par ailleurs, les associations de minéraux lourds et la morphoscopie des quartz des calcaires pulvérulents et des formations meubles qui les surmontent seraient très différentes. S'appuyant sur ces faits, s'appuyant également sur la structure de ce matériau calcaire et sur sa très grande extension, J.H. DURAND pense qu'il s'agit là du résultat de la "précipitation chimique du calcaire dans les lacs" (1963). Ces dépôts dateraient de la fin du Pliocène et du Villafranchien inférieur, période de biostasie (ERHART, 1956) à climat tropical au cours de laquelle se seraient formés, sous forêt, les sols rouges, le calcaire

(1) Les hypothèses de G. AUBERT sont ici présentées d'après quelques publications (1947, 1960) et surtout d'après son enseignement à l'ORSTOM et les tournées sur le terrain que nous avons faites avec lui.

provenant justement des zones où ces sols rouges prenaient naissance. Et J.H. DURAND précise (1956) : "Cette boue peut suivre la topographie de la cuvette du lac et grimper sur ses reliefs, sans que ce fait puisse être évoqué pour infirmer cette théorie". Par la suite, au cours d'une période de rhexistase, ces dépôts de lac auraient été exondés et recouverts par des sédiments qui proviendraient de l'érosion des sols formés autour des lacs pendant la période de biostase. J.H. DURAND pense d'autre part que certaines de ces formations pulvérulentes peuvent être des dépôts de sources.

2° Les nodules farineux qui semblent être ce que nous appellerons les amas friables. Très riches en calcaire (plus de 90 %), ces nodules seraient le plus souvent disposés suivant des verticales dans des limons brun rougeâtre qui sont situés ou non sous les "croûtes zonaires" et qui dateraient surtout de la fin du Villafranchien. Il s'agirait là d'une ségrégation immédiate du calcaire lors de la mise en place (souvent dans les lacs) de dépôts à texture suffisamment fine, ségrégation dans les fentes de retrait de ces dépôts. Ces dépôts dateraient essentiellement de la fin du Villafranchien, mais ont pu se poursuivre jusqu'au Sicilien et même ultérieurement. Ils sont le résultat d'une "rhexistase orogénique" (abaissement du niveau de la mer) sans changement important du climat qui reste tropical. Cette ségrégation du calcaire ne pourrait pas se faire dans des dépôts trop grossiers.

3° La croûte zonaire, qui d'après J.H. DURAND ne dépasse pas 10 cm d'épaisseur, "ne se rencontre que sur des pentes moyennes à légères, jamais sur les abrupts, ni dans les fonds" (1963), recouvre toutes sortes de roches et de dépôts, est pauvre en éléments clastiques, contient environ 75 % de calcaire, et dont les associations de minéraux lourds sont très différentes de celles des dépôts d'épaisseur variable qui les recouvrent. Cette croûte zonaire semble correspondre à la partie supérieure de ce que nous appellerons la croûte et à la pellicule rubanée. D'après cet auteur, "la croûte zonaire s'est formée par dépôt calcaire, précipité au sein d'une nappe d'eau chargée de bicarbonate de calcium, ruisselant en nappe sur des pentes douces favorisant son étalement et l'évasion du gaz carbonique. Ce ruissellement était intermittent et permettait aux feuillets de croûtes de durcir par exposition à l'air. Dans le même temps, la masse calcaire pouvait se briser en polygones par dessiccation et retrait et donner des sortes de dalles, prêtes, lors d'un nouveau ruissellement en nappe, à se recouvrir d'un nouveau feuillet de calcaire épousant les irrégularités de ces dalles et donnant à la cassure un aspect enveloppant" (1963). Ces croûtes zonaires, qui sont de formation postérieure aux limons à nodules farineux, témoigneraient d'une certaine modification climatique, mais sans rhexistase (il n'y a plus de sédimentation détritique) : le climat resterait tropical assez humide et il y aurait encore des forêts, sous lesquelles les sols rouges continueraient à se former, et d'où proviendraient les eaux enrichies en calcaire ; mais il y aurait déjà très probablement une saison sèche. La formation de ces croûtes se serait poursuivie depuis le Sicilien jusqu'à l'Ouljien, époque à laquelle le climat serait devenu brusquement franchement méditerranéen.

4° Les encroûtements, qui seraient toujours des "grès à allure scoriacée pouvant dépasser 1,50 m d'épaisseur et plus durs à leur partie supérieure qu'à leur base" (1963). Pour J.H. DURAND, ces formations proviennent de la remontée capillaire d'eaux chargées en carbonates à partir d'une nappe phréatique qui s'est enrichie en calcaire dans les bassins versants : le calcaire se dépose, "par évaporation du gaz carbonique d'équilibre dans la zone d'aération de la frange capillaire de la nappe ou par augmentation de la température de l'eau vers la surface du sol, phénomènes auxquels peut s'ajouter une certaine évaporation" (1963), cette évaporation étant accélérée par la présence de la végétation. Ce seraient des formations qui ne prendraient jamais naissance en surface et qui dateraient de toutes les époques : elles se formeraient encore actuellement là où peut subsister une certaine végétation naturelle (sur les côtes en particulier).

5° Les racines pétrifiées, très souvent associées aux encroûtements ; elles se formeraient avant ces derniers "en raison de la grande consommation d'eau des plantes qui provoque une concentration rapide de la nappe au niveau des racines et la précipitation des sels qu'elle contient" (1963).

6° Les nodules concrétionnés, qui correspondent aux granules et aux nodules que nous définirons plus loin. D'après J.H. DURAND, ils forment des bancs horizontaux dans les sols, leur nombre passant par un maximum à une certaine profondeur. Ils proviendraient "du lessivage du calcaire des horizons supérieurs du sol et de son dépôt lorsque le milieu devient moins perméable" (1963). Ils ne se formeraient qu'en milieu peu perméable ; en milieu perméable, ils seraient remplacés par des patines. Les pseudo-mycéliums auraient une origine identique. Toutes ces formations n'auraient commencé à se former qu'à partir du Tyrrhénien, après la transformation du climat tropical en climat méditerranéen.

Il faut ajouter que J.H. DURAND attache beaucoup d'importance à l'activité biologique qui produit du gaz carbonique, pour expliquer la dissolution et le transport du calcaire qui vient nourrir les diverses formes d'accumulation décrites.

Les théories avancées par J.H. DURAND sont donc très différentes de celles de G. AUBERT et très différentes également de celles de J. BOULAIN. Il s'agit le plus souvent d'hypothèses assez originales : cependant, elles ne cadrent généralement pas avec les faits observés au Maroc et par ailleurs elles sont en contradiction totale avec tout ce que l'on sait actuellement des climats du Quaternaire marocain.

D - Les travaux de J. BOULAIN

Si J.H. DURAND voit dans les accumulations de calcaire les résultats de phénomènes essentiellement géologiques, c'est par contre surtout à des processus pédologiques que J. BOULAIN fait appel pour expliquer la genèse de ces formations.

C'est tout d'abord dans sa thèse consacrée aux sols de la plaine du Chélif, en Algérie (1957), que cet auteur aborde en détail l'étude de ces problèmes. Il y fait, en premier lieu, une description assez détaillée des diverses formes d'accumulation, et si on peut ne pas être d'accord avec la terminologie originale qu'il propose (1), il est certain que ses descriptions correspondent généralement très bien à tout ce que l'on voit au Maroc. Dans sa thèse, J. BOULAIN décrit également un grand nombre de faits ; on peut en retenir quatre auxquels il semble attacher une importance particulière :

- il met en évidence les relations qui existent entre les diverses formes d'accumulation, aussi bien verticalement qu'horizontalement ;
- il constate que l'accumulation du calcaire est d'autant plus développée que les sols évoluent depuis plus longtemps ;
- il montre le rôle majeur du système racinaire des végétaux qui concentre le calcaire autour de lui ;
- il insiste sur les relations qui, d'après lui, existent entre l'accumulation du calcaire d'une part, la décalcarisation et la rubéfaction des horizons supérieurs d'autre part ; il s'agit là d'un dernier fait qui, à notre avis, ne se vérifie pas au Maroc.

J. BOULAIN en arrive alors aux conclusions suivantes :

- Les carapaces calcaires ne peuvent pas être des formations lacustres ou "des niveaux reliés à des affleurements de calcaires géologiques". Mais ce sont "des formations pédologiques, des horizons d'accumulation formés à l'intérieur d'un sol, mais dont l'ancienneté est certaine. Ces horizons fossiles ont une histoire longue et complexe et ont pu être soumis à des actions postérieures qui les ont remaniés et leur ont fait subir un début de pétrogénèse" (1957, p. 458). La plupart des carapaces calcaires sont des horizons d'accumulation de sols marrons (définition de GUERASSIMOV, 1954), et de sols rouges méditerranéens.

(1) Trab = horizons situés au-dessus de la carapace
Tifkert = partie dure et solide de la carapace
Tafezza = horizons friables de la carapace.

- Les accumulations sont essentiellement le résultat du lessivage vertical du calcaire, qui peut s'accumuler sur plusieurs mètres d'épaisseur ; J. BOULAINÉ considère en effet que la présence d'amas, granules et nodules à plusieurs mètres de profondeur est également le résultat du lessivage du calcaire.

- Les phénomènes de remontée de calcaire ont pu également jouer.

- Le lessivage du calcaire se traduit le plus souvent par une rubéfaction des horizons supérieurs et c'est sous les sols rouges que l'on trouve les plus belles carapaces (1960).

- La végétation, le plus souvent forestière, joue un rôle majeur dans le lessivage et l'accumulation du calcaire. Rôle dans l'accumulation, qui se fait autour des racines qui absorbent l'eau, concentrent les solutions du sol (l'accumulation de calcaire fin pourrait être due à l'action des jeunes racines et les nodules à celle des grosses racines : 1958). Rôle également par le biais de la matière organique : "en plus de phénomènes chimiques de dissolution par le gaz carbonique sous forme de bicarbonate, la migration des carbonates doit surtout être due à l'existence de composés organiques complexes formés probablement par la transformation de la matière organique du sol par la chaleur des étés méditerranéens et en milieu neutre ou légèrement alcalin" (1957 : p. 495). "Il est donc possible de rapporter l'accumulation du calcaire à des modifications chimiques, physiques ou biologiques du potentiel d'oxydo-réduction de certaines fractions du sol en présence de solutions contenant certains composés du calcaire solubilisé soit par l'acide carbonique, soit par des composés organiques complexes" (1957 : p. 500). Les fortes accumulations de calcaire seraient dues à une végétation forestière.

- L'accumulation du calcaire peut également être liée à la présence d'une nappe phréatique enrichie en calcaire : il y a évaporation de cette nappe, remontée capillaire et concentration autour d'un système racinaire.

- Par lessivage ou évaporation d'une nappe, l'accumulation du calcaire peut aller jusqu'à l'encraûtement. Puis il y a remaniement, consolidation, structuration, donnant naissance à la croûte proprement dite, puis formation de la pellicule rubanée ; le tout se faisant à l'intérieur du sol mais par des mécanismes que J. BOULAINÉ ne fait qu'évoquer d'une façon très hypothétique (changement de position relative dans le profil, remaniements, ruissellements internes, action des algues, exsudations, etc. : 1960).

- Enfin, si les accumulations d'amas et granules peuvent prendre naissance assez rapidement, les carapaces sont toujours anciennes, datant le plus souvent du Tyrrhénien (Tensiftien du Maroc).

Il apparaît cependant qu'une grande partie de ces descriptions, faits et hypothèses, J. BOULAINÉ les a ultérieurement limités à un certain ensemble d'accumulations et de carapaces calcaires situées dans les régions sub-humides et semi-arides. En effet, dans deux articles plus récents, J. BOULAINÉ (1961), puis J. BOULAINÉ et J.P. L'HERMITE (1963) distinguent les ensembles suivants :

- les encroûtements calcaires "qui sont toujours en relation avec une nappe phréatique actuelle ou fossile et qui ont un faciès particulier en dehors d'une situation topographique caractéristique (couleur crème ou grise, aspect rognoneux, géodes terreux, tubulures et cavités d'origine végétale, etc.)" (1961). Ce sont "des horizons de concentration du calcaire dans des sols palustres et paléo-palustres".

- Les carapaces calcaires "de la suite des sols rubéfiés" qui sont celles qui ont été décrites dans le Chélif.

- Les carapaces calcaires "de la suite des sols noirs" : ce sont des sols à carapaces calcaires dont les horizons supérieurs ne sont pas rubéfiés et ne sont jamais totalement décarbonatés ; ils se formeraient toujours sous végétation forestière, mais sous un climat un peu plus humide et sur des roches-mères moins perméables, d'où une dégradation plus lente de la matière organique et une remontée biologique du calcaire qui empêche la décarbonatation des horizons de surface. Et les auteurs pensent que les sols rendziniformes que l'on observe en Algérie sont "le résultat de la dégradation des sols de ce genre à la suite de l'assèchement du climat" (1963). Enfin, ils précisent : "dans la zone méditerranéenne froide et humide (Midi de la France, Italie du Nord),

il ne semble pas que de pareils sols aient pu prendre naissance, car le lessivage du calcaire a pris le pas, au moins pendant les périodes pluviales du Quaternaire, sur la remontée biologique. Dans les zones les plus sèches donc dans les zones méridionales, c'est la remontée biologique qui a dû être faible, car la longueur de la saison sèche et la faiblesse des précipitations totales n'a pas permis le ravitaillement de la surface du sol en éléments susceptibles de former du calcaire. Mais les fortes précipitations instantanées ont, par contre, permis l'entraînement en profondeur. Il y a donc place, entre les sols lessivés du nord de la Méditerranée et les sols décarbonatés des zones méridionales, pour des sols forestiers calcaires, à condition que la roche-mère ne soit pas trop perméable. En effet, les sols noirs dont nous présentons l'existence sont très souvent associés avec de véritables terra-rossa, mais qui se sont formées sur des roches-mères très pauvres en argiles (calcaires cristallisés du Jurassique, par exemple). Sur les roches-mères sableuses voisines on trouve aussi des sols rouges, soit complètement décalcifiés, soit à carapaces calcaires" (1963).

- Enfin les carapaces calcaires des zones arides, que J. BOULAIN estime très différentes (plus anciennes, plus épaisses) de celles des régions méditerranéennes. Il ne voit pas comment elles ont pu se former, pense que leur genèse est très complexe et estime qu'il est possible dans ce cas "que le ravitaillement de la surface en éléments calcaires soit surtout dû à des transports physiques (par ruissellement ou par le vent)" (1963).

E - Les travaux de J. WILBERT

Après plusieurs années de prospections pédologiques dans l'ensemble du Maroc, cet auteur publia en 1962 une étude sur les accumulations de calcaire dans les sols de ce pays.

J. WILBERT a été conduit à distinguer les divers faciès suivants :

1° La croûte lamellaire : c'est la croûte zonaire de J.H. DURAND, et, pour J. WILBERT, il s'agit le plus souvent du résultat d'un ruissellement "plus ou moins diffus d'eaux chargées en calcaire, circulant à allure réduite et finissant par stagner en nappe mince, puis s'évaporant sur place en déposant une pellicule superficielle", phénomène qui s'est reproduit plusieurs fois. J. WILBERT adopte donc entièrement les hypothèses de J.H. DURAND. Il admet cependant que lorsque la croûte lamellaire se développe sur un encroûtement tuffeux, cela peut provenir d'un remaniement presque sur place.

2° La croûte tuffeuse ou encroûtement crayeux : ce sont les formations pulvérulentes de J.H. DURAND. J. WILBERT n'y voit pas que des dépôts lacustres, mais plus souvent, étant donné les positions topographiques occupées par ces formations, un apport très abondant de calcaire en milieu très humide (milieu qui n'est pas défini par l'auteur).

3° L'encroûtement nodulaire : ce sont, semble-t-il, les nodules concrétionnés de J.H. DURAND, c'est-à-dire ce que nous appellerons les horizons à granules et nodules et les encroûtements nodulaires. D'après J. WILBERT, les nodules en place seraient le résultat "d'un phénomène d'interface, le calcaire de la solution du sol, ou d'une nappe d'origine superficielle, se déposant sous l'action de la température et du dégagement du CO₂ dans des cavités du sol : trous de racines, tunnels d'animaux fouisseurs, pores, fissures, résultant du foisonnement et du retrait des mottes. Le milieu serait caractérisé par des alternances de périodes humides, coïncidant avec l'apport du calcaire au sein d'une nappe temporaire, et de périodes sèches, qui résulteraient, soit du drainage par les racines, soit de la dessiccation à partir de la surface, toutes les argiles foisonnant, ne serait-ce que faiblement". Ces horizons à nodules se développent à l'intérieur des sols, mais généralement à faible profondeur ; le calcaire provient un peu de la décalcification des horizons de surface, mais surtout est apporté par l'eau qui chemine sur et dans les sols. J. WILBERT précise enfin que les nodules que l'on trouve dans les sols sont souvent remaniés, c'est-à-dire qu'ils proviennent de l'érosion d'encroûtements nodulaires plus anciens.

4° L'encroûtement stalactiforme : "il s'agit d'un dépôt cristallisé, mais moins nettement que dans le cas précédent, donnant des petites stalactites fixées sous des cailloux dont la surface supérieure n'est généralement pas atteinte par le processus de recouvrement calcaire". Ce type d'accumulation de calcaire est en effet assez fréquent au Maroc et il s'agirait, pour J. WILBERT, de dépôts "de nappe circulante dans des traînées ou des lentilles caillouteuses particulièrement filtrantes".

5° L'encroûtement de type diffus (faciès palustre) : ce seraient des encroûtements peu marqués dont l'aspect est voisin du gley. Pour l'auteur, il s'agit là du résultat de la consolidation d'une boue calcaire au fond de dayas ou de marécages.

6° Les conglomérats calcaires : ce sont des dalles compactes, caillouteuses, qui seraient soit interstratifiées dans les encroûtements nodulaires, soit situées au sommet des terrasses du Quaternaire moyen et ancien dans certaines régions semi-arides et arides (Moulouya en particulier). Dans le premier cas, il s'agirait du résultat d'une circulation d'eau dans un milieu poreux, ces conglomérats prenant naissance en même temps que les encroûtements nodulaires. Dans le deuxième cas il s'agirait "de la consolidation d'une phase terminale d'alluvionnement de régime intermittent et brutal (torrentiel) par des ruissellements d'eaux chargées de calcaire".

7° L'encroûtement en taches de calcaire pulvérulent : ce sont les nodules farineux de J.H. DURAND, ce que nous appellerons les amas calcaires. Ce phénomène se produirait dans des sols préalablement en partie décalcarisés, rubéfiés et enrichis en argile gonflante en profondeur. Il y a alors dépôt de calcaire dans des fentes de dessiccation par des eaux de percolation, et par ségrégation du calcaire qui est en somme rejeté des agrégats vers les fissures.

Voilà donc une nouvelle série de distinctions et d'hypothèses qui apportent quelques idées importantes. J. WILBERT a, au fond, fait appel à toutes les possibilités de la géologie, de la géomorphologie et de la pédologie. Ces hypothèses paraissent cependant trop hétérogènes pour des formations qui, dans la nature, sont étroitement associées.

2 - DESCRIPTION DES FORMES D'INDIVIDUALISATION ET D'ACCUMULATION DU CALCAIRE

Dans un article récent sur le Quaternaire Marocain, rédigé avec G. BEAUDET et G. MAURER (1967), nous avons déjà proposé une nouvelle nomenclature qui sera reproduite ici d'une façon plus détaillée.

L'accumulation ou l'individualisation du calcaire dans les dépôts quaternaires et dans les sols (isohumiques et rouges) peut se réaliser sous huit formes différentes : les accumulations diffuses, les amas friables, les granules, les nodules, les encroûtements, les croûtes, les dalles compactes, les pellicules rubanées.

A - Les accumulations diffuses

Il s'agit là d'un premier stade généralement très peu accentué de l'accumulation du calcaire dans un horizon. Il n'y a dans cet horizon, aucune individualisation notable du calcaire qui reste sous la forme d'éléments fins. On peut voir cependant apparaître des pseudo-mycéliums calcaires qui soulignent la porosité du sol, c'est-à-dire les fentes qui séparent les agrégats et surtout les pores qui marquent les emplacements d'anciennes racines ; dans ce dernier cas, ces pseudo-mycéliums sont souvent des "gaines radiculaires de calcaire" (BOULAIN, 1957) que l'on peut voir aussi se développer autour des racines actuelles. Cependant la granulométrie du calcaire reste toujours voisine de celle des horizons qui encadrent le niveau d'accumulation ; on note seulement que ce calcaire s'accumule surtout sous la forme de fractions limoneuses (2-20 microns).

Ces horizons d'accumulation diffuse apparaissent généralement d'une couleur plus claire que les horizons moins calcaires situés au-dessus ou au-dessous. Mais souvent, seul le dosage du calcaire permet de déceler leur présence. D'ailleurs la teneur en calcaire de ces horizons est extrêmement variable. Elle se modifie d'un sol à l'autre : cela dépend de la richesse en calcaire des matériaux originels dans lesquels ils se forment ; cela dépend également si cette accumulation est la seule présente dans le sol (par exemple : accumulation de calcaire dans des sols alluviaux ou colluviaux peu évolués) ou si elle annonce des accumulations de calcaire plus importantes situées au-dessus ou au-dessous d'elle. Elle est également variable à l'intérieur d'un horizon d'accumulation : en général, entre deux limites qu'il est difficile de situer, la teneur en calcaire croît puis décroît régulièrement du haut vers le bas ; ou bien elle croît régulièrement vers le bas ou vers le haut, quand on se rapproche d'un horizon d'accumulation plus puissant, un accroissement par exemple. Cependant, le plus souvent, la teneur maximum en calcaire ne dépasse pas 30 à 40 %.

L'épaisseur de ces horizons d'accumulation diffuse est également assez variable : quelques dizaines de centimètres en moyenne.

B - Les amas friables

Il s'agit là d'une première forme d'individualisation du calcaire qui est très fréquente dans les sols et les dépôts du Quaternaire.

Les amas friables, qui semblent correspondre à ce que J.H. DURAND (1953, 1959) appelle les "nodules farineux", sont des concentrations de calcaire, non consolidées, dispersées dans la masse d'un horizon. Ce sont les taches calcaires de J. WILBERT (1962).

Leurs formes, leurs dimensions et leurs couleurs sont très variées : depuis la "sphère" jusqu'à la "chandelle verticale" ils auraient, d'après J. WILBERT, de quelques millimètres à 25 centimètres de longueur et de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur. Le plus souvent, ils sont cependant de dimensions assez réduites. Ils sont généralement de couleur blanche à crème. Par ailleurs :

- les contours de ces amas peuvent être plus ou moins nets ; il peut s'agir d'un véritable granule ou nodule farineux, très blanchi, très riche en calcaire, très bien délimité ; mais par contre, il peut s'agir également de quelque chose de très diffus, d'une concentration locale et assez faible du calcaire, qui imprègne, en partie ou en totalité, un ou plusieurs agrégats ;

- il est assez fréquent que ces amas se réduisent à de fines pellicules, blanches ou crème, qui pénètrent la micro-structure du sol ou du dépôt.

Un certain nombre de points importants doivent être soulignés :

- Quand ces amas ne sont pas de forme sphérique, leur grand axe est généralement proche de la verticale.

- La densité de ces amas dans les horizons pédologiques ou géologiques, est très variée. Cependant, mis à part probablement les horizons à très gros amas calcaires que cite J. WILBERT, horizons qui sont assez rares dans les dépôts et les sols post-villafranchiens, la teneur en calcaire de l'ensemble de l'horizon, amas compris, dépasse rarement 50 %. Par ailleurs, il faut bien souligner qu'il s'agit d'amas calcaires, plus ou moins individualisés quant à leurs contours, mais toujours nettement séparés les uns des autres par de la terre brune ou rubéfiée qui peut être calcaire ou non.

- Ces amas calcaires peuvent être présents soit dans un ou plusieurs horizons d'un sol, soit dans un ou plusieurs niveaux d'un dépôt, soit sur toute l'épaisseur d'un dépôt (Amirien par exemple). On ne les trouve cependant jamais, sauf érosion récente, dans un horizon superficiel.

- Entre les amas, il y a souvent également une accumulation diffuse de calcaire, mais ce n'est pas toujours le cas, car la présence d'amas friables n'implique pas forcément une accumulation du calcaire, c'est-à-dire une augmentation de la teneur en calcaire de l'horizon à amas par rapport aux horizons qui l'entourent. Il peut s'agir d'une simple concentration du calcaire déjà présent.

Pour l'ensemble de ces raisons, nous ne voulons pas adopter la dénomination "d'encroûtement à taches calcaires" utilisée en particulier par J. WILBERT, l'encroûtement devant impliquer à la fois l'accumulation et une teneur élevée en calcaire. Il semble préférable de parler simplement d'horizon à amas friables de calcaire.

Ces horizons, dont les limites sont en général assez diffuses, sont très fréquents dans les sols marocains. En particulier ils peuvent soit représenter la totalité de l'horizon d'accumulation du calcaire des sols isohumiques, soit accompagner une accumulation plus puissante (croûte, encroûtement) : ils peuvent alors se situer au sommet et à la base de cette accumulation.

Par le jeu de la teneur en calcaire des amas, de la densité de ces amas dans les horizons et de l'accumulation diffuse du calcaire entre les amas, les variations de la richesse en calcaire de ces horizons obéissent aux mêmes lois que celles définies pour les accumulations diffuses (voir paragraphe II - A).

C - Les granules et les nodules

Très fréquents également dans les sols et les dépôts du Quaternaire marocain, les granules et les nodules calcaires peuvent être définis comme des amas de calcaire plus ou moins durcis, dispersés dans la masse d'un horizon, la couleur intérieure de ces amas variant du blanc au saumon. Ce sont les "nodules concrétionnés" de J.H. DURAND.

Comme pour les amas, leurs formes et leurs dimensions sont variées ; le plus souvent, ils sont cependant plutôt sphériques ou cylindriques (quand ils sont cylindriques, ils sont toujours disposés presque verticalement) et le volume des nodules dépasse rarement quelques centimètres cubes (dans la plaine des Triffa, certains dépôts du Quaternaire moyen contiennent de très gros nodules, de forme conique ou cylindrique, pouvant avoir plus de 5 centimètres de diamètre et une dizaine de centimètres de hauteur : on les nomme alors "rognons" ; on retrouve également ces rognons dans les horizons d'accumulation de certains sols rouges méditerranéens des Bni Snassène). Par définition, les granules ne sont que de petits nodules, d'un diamètre inférieur à un centimètre.

Le durcissement des granules et nodules est plus ou moins accentué et la couleur intérieure varie souvent en fonction de ce durcissement : quand ils sont très durcis, ils sont généralement de teinte saumon, et ils tendent vers le blanc quand ils sont plus tendres. Cependant, assez souvent, la consolidation de ces concrétions varie d'une façon importante en fonction de leur humidité : tendres quand on les prélève dans un horizon humide, ils durcissent rapidement quand on les laisse sécher à l'air. Par ailleurs, très souvent également, leur constitution est hétérogène : le noyau peut être très dur, de couleur saumon, alors que vers l'extérieur le calcaire est plus tendre, plus blanc ; l'inverse est aussi possible, mais plus rare. Enfin, il est fréquent que l'intérieur des granules et nodules présente des inclusions (gravier), autour desquels ils se sont peut-être constitués, et des cavités plus ou moins grandes qui sont probablement des fentes de retrait, cavités dans lesquelles on peut trouver des éléments libres, calcaires ou non.

La densité des granules et nodules calcaires dans les horizons pédologiques ou géologiques est très variée. Quand ils deviennent très nombreux, on passe à des encroûtements granulaires et nodulaires qui seront définis plus loin (paragraphe II - D). Mais il est très fréquent que ces concrétions ne soient pas suffisamment nombreuses pour que l'on puisse parler d'encroûtement : une proportion importante de terre brune ou rubéfiée subsiste entre eux ; nous parlerons alors d'horizons à granules, d'horizons à nodules ou d'horizons à granules et nodules. Très souvent ces concrétions sont alignées plus ou moins verticalement, comme si elles dessinaient un ancien système racinaire.

Les points suivants doivent encore être soulignés :

- Les granules et nodules peuvent être présents soit dans un ou plusieurs horizons d'un sol, soit dans un ou plusieurs niveaux d'un dépôt, soit, ce qui est plus rare, sur toute l'épaisseur d'un dépôt. On ne les trouve cependant jamais, sauf érosion récente, ou transport, dans un horizon superficiel.

- En général, les horizons à granules ou nodules contiennent également des amas calcaires plus ou moins friables.

- Par le jeu de la teneur en calcaire des amas, des granules et des nodules, de leur densité dans les horizons et par le jeu de l'accumulation diffuse qui peut se produire entre eux, les variations de la richesse en calcaire des horizons contenant ces concrétions obéissent aux mêmes lois que celles définies pour les accumulations diffuses (paragraphe II - A). Cependant, la richesse en calcaire de ces horizons est généralement assez forte, pouvant atteindre 60 % et, à la différence des horizons à amas calcaires, il semble que les horizons à granules et nodules soient toujours de véritables horizons d'accumulation du calcaire. Les horizons à granules et nodules sont donc plus évolués que ceux à amas ; ils occupent cependant dans les sols et les dépôts des positions identiques.

D - Les encroûtements

A partir du moment où, dans un horizon, l'accumulation du calcaire, qu'elle soit diffuse, en amas, en granules ou en nodules, devient telle qu'elle fait disparaître en très grande partie ou totalement la couleur brune ou rubéfiée habituelle des sols et des dépôts, il faut donner à cet horizon le nom d'encroûtement calcaire. En général, cette accumulation du calcaire s'accompagne d'un certain durcissement qui peut être assez accentué.

La morphologie et la structure des encroûtements sont très variées. On peut cependant distinguer deux types principaux :

- L'encroûtement crayeux ou tuffeux, de couleur assez homogène à tendance claire (rose, crème ou blanc) ; la structure est plutôt massive, parfois polyédrique, parfois également finement feuilletée ; le durcissement est variable, mais en général plutôt faible. Il s'agit là, semble-t-il, des "formations pulvérulentes" de J.H. DURAND (et peut-être aussi de ses "encroûtements calcaires") et du "tifkert ou tafezza homogène ou feuilleté" de J. BOULAINÉ (1957) (tifkert = formations durcies ; tafezza = formations tendres, friables).

- L'encroûtement nodulaire, de couleur également claire, mais moins homogène : c'est un horizon à granules et nodules, plus ou moins nombreux, pris dans une gangue très calcaire. La structure est à la fois nodulaire et polyédrique et elle peut être finement feuilletée ; le durcissement est en général assez marqué. Ce type d'encroûtement correspond probablement à une partie de ce que J.H. DURAND appelle "les nodules concrétionnés", à une partie des "encroûtements granulaires et nodulaires" de J. WILBERT, et à ce que J. BOULAINÉ dénomme "Tifkert ou tafezza nodulaire".

Les autres principales caractéristiques de ces encroûtements sont les suivantes :

- Leur épaisseur peut varier de quelques centimètres jusqu'à plusieurs mètres. Le plus souvent cependant, elle oscille entre quelques dizaines de centimètres et un ou deux mètres.

- Quand l'encroûtement n'est pas surmonté par une croûte, sa limite supérieure est presque toujours bien tranchée. Il est alors coiffé par un horizon très nettement moins calcaire mais pouvant contenir des amas friables, des granules et des nodules.

- Au contraire, quand il est surmonté par une croûte, il y a généralement passage progressif de l'encroûtement à la croûte : l'encroûtement vers le haut, devient de plus en plus feuilleté, de plus en plus compact, de plus en plus dur.

- La base des encroûtements est, par contre, presque toujours très peu marquée : il y a passage très progressif à des horizons à amas friables, à granules ou à nodules. De même, dans une chaîne de sols, les encroûtements peuvent passer latéralement à des horizons à amas, granules ou nodules.

- La teneur en calcaire des encroûtements est toujours très élevée, supérieure à 60 %. Presque toujours, elle augmente progressivement du bas vers le haut.

- Un dépôt quaternaire, sauf s'il est peu épais, n'est jamais entièrement transformé en encroûtement et ces formations sont rarement situées, dans un dépôt, à une très grande profondeur : ce sont presque toujours des horizons sub-superficiels.

- Les encroûtements peuvent être caillouteux. Signalons d'ailleurs que, lorsque les encroûtements sont très caillouteux, ils ne sont pas toujours continus ; en effet, on constate souvent que l'accumulation du calcaire se fait alors autour de chaque caillou et d'une façon stalagtitiforme : le sommet du caillou n'est recouvert que par une pellicule de calcaire tandis qu'une épaisseur assez forte de calcaire plus ou moins durci est accrochée à sa partie inférieure, l'ensemble caillou et calcaire formant comme un cône irrégulier dont la pointe est tournée vers le bas. Quand l'encroûtement devient plus puissant, les cailloux encroûtés se soudent progressivement les uns aux autres, donnant naissance à un encroûtement de plus en plus continu.

E - Les croûtes

Nous appelons croûte calcaire, une formation très calcaire (plus de 70 %), durcie (mais pas forcément très dure), et qui présente toujours une structure lamellaire, feuilletée, très accentuée. Son épaisseur peut varier de quelques centimètres à plus d'un mètre. C'est le "Tifkert zonaire" de J. BOULAIN et une partie de la "croûte zonaire" de J.H. DURAND.

La croûte calcaire est constituée par la superposition de feuillets, pouvant être assez épais en surface (plusieurs centimètres), mais toujours de plus en plus fins quand on va vers la profondeur. Ces feuillets ne sont pas continus, surtout ceux de surface ; ils sont séparés par des fentes sub-horizontales s'anastomosant entre elles, les fentes étant de plus en plus fines quand on va du haut vers le bas : vers le haut, ces fentes peuvent avoir quelques centimètres d'épaisseur et sont alors souvent remplies par de la terre qui provient du sol situé au-dessus de la croûte.

La teneur en calcaire et le durcissement de la croûte diminuent toujours quand on va du haut vers le bas. Il peut y avoir plus de 90 % de calcaire en surface, et les feuillets supérieurs, sur plusieurs dizaines de centimètres peuvent être durcis (croûtes villafranchiennes). Souvent, le feuillet tout à fait supérieur peut se transformer partiellement en dalle compacte.

La structure interne des feuillets de croûte est soit massive, soit nodulaire, soit finement feuilletée.

Quand il n'y a pas de dalle compacte au sommet de cette croûte, le feuillet supérieur, qui peut avoir une dizaine de centimètres d'épaisseur, est généralement très brisé, par des fentes verticales, la pellicule rubanée, qui peut le recouvrir, pénétrant alors dans ces fentes.

La croûte calcaire est généralement blanche à blanc-crème ; les taches noires sont fréquentes. Quand elle est très durcie, elle a tendance à devenir plus rose : on voit souvent des morceaux de croûte qui sont roses, très durs, très compacts (comme la dalle compacte) sur une épaisseur plus ou moins grande à partir du sommet et des côtés, le centre et la base restant blancs et plus tendres, et le passage entre les deux faciès étant continu ; c'est la transformation de la croûte en dalle compacte.

La croûte calcaire est souvent caillouteuse, et peut contenir de la matière organique en quantités non négligeables (BEAUDET, JEANNETTE et MAZEAS, 1964).

Le sommet de la croûte est toujours très nettement dessiné. Mais quand elle n'est pas protégée par une dalle compacte, elle est souvent remaniée, reprise par la base de l'horizon situé au-dessus.

Enfin, à sa base, la croûte calcaire passe, le plus souvent, à un encroûtement. Mais il s'agit toujours d'une transition très progressive, la limite entre les deux horizons étant souvent très difficile à placer d'une façon précise. On peut admettre en général que c'est l'apparition d'un feuilletage prononcé qui doit constituer la limite entre les deux formations. Latéralement, dans une chaîne de sols, le passage d'une croûte à un encroûtement est également un fait courant.

F - La dalle compacte

La dalle compacte est une formation constituée par un ou plusieurs feuillets de calcaire extrêmement durs, de couleur grise ou plus souvent saumon, chaque feuillet pouvant atteindre 10 à 20 cm d'épaisseur. Ces feuillets sont généralement très continus, non brisés, leur structure interne étant très massive ; il n'y a aucune structure zonaire, mais simplement quelques fentes de retrait généralement très fines. Ces dalles sont souvent très caillouteuses. La teneur en calcaire est généralement supérieure à 90 %.

Il s'agit là d'une formation qui semble n'avoir jamais été décrite. Au Maroc, elle couronne fréquemment les épaisses croûtes calcaires qui coiffent les formations villafranchiennes des régions orientales.

Signalons qu'il existe souvent des formations intermédiaires entre les croûtes et des dalles compactes : ce sont des feuillets de croûte qui sont durcis au sommet comme des dalles compactes ; ces feuillets constituent soit le sommet d'une croûte, soit un horizon intermédiaire entre la croûte et la dalle compacte. Les dalles compactes elles-mêmes peuvent être incomplètement consolidées, c'est-à-dire qu'elles contiennent généralement vers la base des zones à forme de noyaux ou de traînées qui sont encore blanchâtres et assez tendres. Il y a donc en somme toute une série d'intermédiaires entre les croûtes et les dalles compactes.

G - La pellicule rubanée

Il s'agit d'une formation très dure et très calcaire (plus de 80 %), dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à quelques centimètres. Elle est très nettement stratifiée, constituée par la superposition de très nombreuses lamelles très fines. Sa couleur générale est blanche ou saumon, mais elle présente toujours plusieurs filets plus ou moins sombres, quelquefois bien noirs (matière organique ?).

Cette pellicule ne se développe qu'au sommet des dalles compactes, des croûtes calcaires (quand la dalle compacte n'existe pas) ou des encroûtements durcis (quand il n'y a pas de croûte).

Quand elle recouvre une croûte, elle tapisse toutes les surfaces supérieures et latérales des morceaux du feuillet supérieur de la croûte ; mais elle ne se développe que très peu, ou pas du tout, à la base du feuillet. Par ailleurs, quand les fentes sub-horizontales qui séparent les feuillets de croûte sont assez larges, la pellicule rubanée peut se développer sur les parois de ces fentes, surtout sur les parois inférieures (faces supérieures des feuillets de croûte).

La pellicule rubanée est le "tifikert rubané" de J. BOULAIN. Elle est incluse dans la croûte zonaire de J.H. DURAND et dans la croûte lamellaire de J. WILBERT.

H - Les carapaces calcaires

Nous donnons le nom général de carapace calcaire à toutes les formations très calcaires qui viennent d'être décrites, à savoir les encroûtements, les croûtes, les dalles compactes et les pellicules rubanées.

Une carapace calcaire peut donc, selon les cas, être formée par :

- un encroûtement seul ;
- une croûte seule (cas rare) ;
- une croûte surmontant un encroûtement ;
- une pellicule rubanée surmontant une croûte et un encroûtement ;
- une dalle compacte surmontant une croûte et un encroûtement ;
- une pellicule rubanée surmontant une dalle, une croûte et un encroûtement.

Par ailleurs, afin d'éviter certaines confusions d'interprétation, nous n'utilisons le verbe "encroûter" que pour parler de la présence ou de la formation d'une carapace calcaire. Pour les autres formations (accumulations diffuses, amas, granules, nodules), il faut parler d'accumulation ou d'individualisation du calcaire.

3 - LES HORIZONS D'INDIVIDUALISATION ET D'ACCUMULATION DU CALCAIRE DANS LES SOLS ET LES DÉPÔTS

Il faut commencer par distinguer deux types d'individualisation et d'accumulation du calcaire qui semblent fondamentalement différents :

- celles qui affectent une roche, c'est-à-dire en général un dépôt quaternaire, soit sur une grande épaisseur, c'est-à-dire plusieurs mètres, soit à une profondeur importante ;

- celles qui n'affectent que la partie supérieure des roches-mères, c'est-à-dire que l'on peut considérer comme faisant partie du sol (rappelons qu'il ne s'agit que de sols isohumiques, de sols rouges ou de sols qui en dérivent).

A - L'individualisation et l'accumulation du calcaire dans les dépôts quaternaires

Dans l'ensemble du Maroc, les dépôts quaternaires présentent très souvent des horizons où le calcaire s'accumule et s'individualise. Mais en général, ces phénomènes ne dépassent pas le stade de l'amas friable, du granule ou du nodule, et c'est l'amas friable qui est le plus fréquent. Les différentes formes de carapace calcaire sont au contraire très rares ; il existe bien entendu des carapaces enfouies profondément, mais on peut alors presque toujours démontrer que cette carapace marque la limite entre les dépôts de deux époques différentes du quaternaire, et qu'elle s'est donc formée dans ou sur les horizons supérieurs du dépôt le plus ancien. Il faut cependant signaler, d'une part, les puissantes "croûtes stalagtitiformes" de la plaine du Tadla dont l'origine est probablement lacustre, d'autre part, certaines croûtes ou dalles que l'on voit localement se développer dans les horizons assez caillouteux de certains dépôts : ce dernier cas est assez fréquent en Basse Moulouya.

En ce qui concerne les amas friables, granules et nodules, plusieurs cas peuvent se présenter :

- certains dépôts peuvent être entièrement affectés par ces inclusions, et d'une façon homogène ;

TABLEAU 1 - Les formes d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les dépôts et dans les sols

Dénomination	Définition	Forme	Dimensions	Limites de l'horizon	Epaisseur de l'horizon	Couleur	Structure de l'horizon	Durcissement	% calcaire dans l'horizon	Divers
Accumulation diffuse	Accumulation sans individualisation du calcaire ; parfois pseudamycolium	Pseudomycolium ; filaments blanchâtres allongés plus ou moins verticalement		Très diffuses ; souvent non visibles	Quelques dizaines de cm	Parfois plus clair que les horizons qui l'entourent	Polyédrique	Nul	< 40 %	
Amas friables	Amas de calcaire friables, dispersés dans la masse d'un horizon	Contours plus ou moins nets ; formes très variées, parfois pelliculaires	De quelques mm à 25 cm de longueur quelques mm à quelques cm d'épaisseur	Progressives	Très variable ; peuvent être présents sur toute l'épaisseur d'un dépôt.	Blanc à crème ; brun ou rubéfié entre les amas	Polyédrique	Nul ou faible	< 50 %	Densité dans l'horizon : très variable
Granules	Amas de calcaire plus ou moins durcis, dispersés dans la masse d'un horizon	Formes variées souvent sphériques ou cylindriques (grand axe souvent vertical)	Diamètre inférieur à 1 cm	Progressives	Très variable ; peuvent être présents sur toute l'épaisseur d'un dépôt	Blanc à saumon ; brun ou rubéfié entre les granules	Polyédrique	Du granule et du nodule : généralement fort mais peut varier en fonction de l'humidité et n'est pas homogène ; de l'horizon : faible	< 60 %	Densité dans l'horizon : très variable
Nodules	Amas de calcaire plus ou moins durcis, dispersés dans la masse d'un horizon	Formes variées, souvent sphériques ou cylindriques (grand axe souvent vertical)	Volume : quelques cm ³	Progressives	Très variable ; peuvent être présents sur toute l'épaisseur d'un dépôt	Blanc à saumon ; brun ou rubéfié entre les nodules	Polyédrique		< 60 %	Densité dans l'horizon : très variable
Rognons	Amas de calcaire très durcis	Formes variées ; souvent coniques ou cylindriques	Volume : quelques dizaines à quelques centaines de cm ³	Progressives	Très variable	Saumon, brun ou rubéfié entre les rognons	Polyédrique	Du rognon : très fort ; de l'horizon : faible	< 60 %	Amas, granules, nodules et rognons peuvent être associés dans un même horizon
Encroûtement crayeux ou tuffeux	Horizon très calcaire, de couleur claire à structure souvent massive			Progressive à la base ; passage à un horizon à amas, granules ou nodules ; généralement nette au sommet s'il n'y a pas de croûte ; progressive s'il y a une croûte	Quelques dizaines de cm à quelques mètres ; le plus souvent 30 à 200 cm	Rose, crème ou blanc ; plus ou moins homogène	Massif ; parfois polyédrique ; parfois finement feuilleté surtout vers le sommet	Généralement assez faible	> 60 % augmentation progressive du bas vers le haut	Si la roche-mère est très caillouteuse, l'encroûtement est souvent strogiforme : accumulation de calcaire plus ou moins durci à la base de chaque caillou
Encroûtement nodulaire	Horizon à granules et nodules pris dans une gangue très calcaire				Quelques dizaines de cm à quelques mètres ; le plus souvent 30 à 200 cm	Rose, crème, ou blanc ; plus ou moins homogène	Nodulaire et polyédrique ; parfois finement feuilleté surtout vers le sommet	Généralement assez marqué	> 60 % augmentation progressive du bas vers le haut	
Croûte	Horizon très calcaire, durci à structure lamellaire, feuilletée très accentuée	Superposition de feuillets discontinus ; le feuillet supérieur est souvent brisé verticalement	Epaisseur des feuillets : quelques mm à quelque cm (l'épaisseur croît du bas vers le haut)	Progressive à la base ; passage à l'encroûtement ; nette au sommet	Quelques cm à plus d'un mètre	Blanc à blanc-crème, parfois rose ; taches noires	Lamellaire, feuilletée, structure des feuillets massive, nodulaire ou finement feuilletée	Dur à très dur ; augmentation du bas vers le haut	> 70 % augmentation progressive du bas vers le haut	Surmonte presque toujours un encroûtement
Dalle compacte	Un ou plusieurs feuillets calcaires très durs	Feuillets continus	Epaisseur des feuillets : quelques cm jusqu'à 20 cm	Nettes	Quelques cm à quelques dizaines de centimètres	Gris ou saumon ; peuvent présenter des zones blanchâtres	Très compacte, fentes de retrait ; peuvent présenter des zones moins durcies	Très dur	> 80 %	Surmonte toujours une croûte
Pellicule rubanée	Pellicule calcaire très dure pouvant recouvrir les croûtes et les dalles	Epaisseur parfaitement les ondulations de la surface qu'elle recouvre		Nettes	Quelques mm à quelques cm	Blanc ou saumon ; filets sombres	Très finement lamellaire	Très dur	> 80 %	Surmonte toujours une dalle compacte, une croûte ou un encroûtement durci

- d'autres dépôts sont également entièrement affectés, mais d'une façon hétérogène : ils présentent des horizons, plus ou moins continus, et plus ou moins épais (quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre), où la densité des amas, granules ou nodules est nettement plus forte ; il peut aussi y avoir des niveaux où la proportion des granules et nodules est plus ou moins forte par rapport aux amas friables, la texture de dépôt ayant dans ce cas une très grande importance : il semble en effet que la formation des concrétions durcies soit favorisée par une texture plus grossière ;

- enfin, dans certains dépôts, les amas, granules ou nodules calcaires n'affectent pas toute l'épaisseur ; ils constituent seulement un ou plusieurs horizons, plus ou moins épais, et situés plus ou moins profondément.

Trois observations importantes doivent encore être faites :

- Les dépôts du quaternaire récent (Soltanien et Rharbien) sont rarement affectés, en dehors de la zone de pédogénèse (dont l'épaisseur est faible), par l'apparition d'amas ou, encore moins souvent, de concrétions calcaires. Par contre, le phénomène est très général dans les dépôts plus anciens, les granules et les nodules étant plus fréquents au Tensiftien et les amas friables à l'Amirien .

- Les amas, granules et nodules apparaissent très fréquemment et en quantités importantes, dans des dépôts qui n'étaient très certainement pas ou qui étaient peu calcaires lors de leur mise en place. Plusieurs exemples existent en Basse Moulouya et en particulier dans la plaine du Zebra, dans des dépôts qui proviennent de l'altération des schistes primaires de la chaîne des Kbdana. Cependant, un amont calcaire ou calcique, d'où proviennent les eaux, est bien entendu nécessaire.

- Ces phénomènes d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les dépôts sont souvent accompagnés par certains indices d'une hydromorphie ancienne qui fut probablement assez faible : structuration (en particulier structures polyédriques fines à faces lissées), plages de couleur plus grisâtre ou plus rubéfiée, poches plus argileuses, quelquefois individualisation du fer.

B - L'individualisation et l'accumulation du calcaire dans les sols

Avant d'aborder l'exposé assez général des faits, il semble utile, à titre d'exemple, de décrire rapidement ce que peut être le profil calcaire d'un sol isohumique subtropical, sol dont le caractère essentiel est justement la présence d'un horizon d'accumulation du calcaire (RUELLAN, 1966) (1).

Le profil calcaire d'un sol isohumique peut prendre des aspects très variés :

- Tout d'abord, le sol peut être uniformément calcaire ou décalcarisé jusqu'à la roche-mère, qui présente la même teneur en calcaire que le sol. Il n'y a donc ni individualisation ni accumulation de calcaire, et nous ne classons d'ailleurs pas ces sols parmi les sols isohumiques : ce sont des sols peu évolués d'apport, que l'on ne trouve que sur des dépôts récents.

- Certains sols (figure n° 1), dans lesquels il n'y a aucune individualisation visible du calcaire, et qui sont calcaires ou non en surface, présentent soit une augmentation progressive du calcaire jusqu'à la roche-mère (augmentation qui commence dès la surface si le sol est calcaire ;

(1) D'après G. AUBERT, les sols isohumiques subtropicaux sont essentiellement caractérisés par une matière organique d'origine steppique, bien évoluée et répartie profondément ; par ailleurs, ils présentent souvent un B argileux. Ces sols isohumiques, d'après la teneur en matière organique, d'après le profil calcaire et d'après la structure, sont divisés en sols châtaîns, sols bruns, sierozems.

Pour le Maroc, nous avons cependant proposé récemment (1966) une nouvelle classification de ces sols essentiellement fondée sur le profil calcaire ; en effet l'isohumisme n'est pas au Maroc spécifique des sols isohumiques et il est pratiquement impossible de classer ces sols d'après la teneur en matière organique et la structure. Par contre, le profil calcaire semble bien traduire pour chaque sol un degré et un mode d'évolution.

à partir d'une profondeur variable, quelques dizaines de centimètres au maximum, si le sol n'est pas calcaire en surface), soit une zone légèrement plus riche en calcaire que la surface et le matériau originel, horizon d'accumulation du calcaire dont il est impossible de marquer les limites. Ces sols, qui se développent toujours sur des matériaux que l'on peut dater du quaternaire récent (Rharbien ; même Soltanien dans les régions très arides), sont des sols isohumiques jeunes peu évolués.

- D'autres sols, et ce sont en Basse Moulouya parmi les plus fréquents, présentent un horizon d'individualisation du calcaire qui est également presque toujours un horizon d'accumulation de cet élément. L'individualisation du carbonate se présente soit sous forme d'amas, soit sous forme d'amas et granules, soit enfin sous forme d'amas, granules et nodules, la densité de ces inclusions étant plus ou moins forte. Le profil calcaire de ces sols, que l'on peut qualifier de typiques, peut présenter divers aspects (voir figure n° 1) : le sol peut être non ou peu calcaire sur une épaisseur plus ou moins grande, puis la teneur en calcaire augmente rapidement, l'individualisation apparaissant alors presque tout de suite ; dans d'autres sols, l'augmentation en calcaire débute dès la surface du sol et généralement s'accroît quand l'individualisation apparaît à une profondeur variable (20 à 50 centimètres le plus souvent) ; dans les deux cas, la teneur en calcaire rediminue généralement en profondeur ; enfin, assez souvent, l'accumulation et l'individualisation peuvent se réaliser en deux temps : après un horizon supérieur, calcaire ou non, et s'il est calcaire, cet élément est constant ou ne croît que lentement, un deuxième horizon voit sa teneur en calcaire augmenter plus rapidement et contient des formes d'individualisation du calcaire en général assez peu nombreuses et de faibles dimensions ; puis on aborde rapidement un troisième horizon, dans lequel l'individualisation du calcaire est beaucoup plus importante et où l'augmentation de la teneur en cet élément augmente beaucoup plus rapidement, atteint un maximum, puis rediminue. Cette double accumulation, qui ne se produit que si le troisième horizon commence à une profondeur suffisante (au moins plus de 40 centimètres) est très souvent le résultat de deux pédogénèses successives qui se sont développées soit dans un même matériau originel, soit au contraire dans deux dépôts superposés, le dépôt supérieur s'étant mis en place après la formation et l'érosion partielle du sol le plus ancien. Signalons que dans certains sols, il n'y a pas vraiment d'accumulation de calcaire en profondeur, mais seulement augmentation plus ou moins régulière de la teneur en calcaire depuis la surface jusqu'à la roche-mère. Souvent ce phénomène provient de ce que le matériau originel est complexe, c'est-à-dire qu'il est constitué par plusieurs dépôts superposés et peu épais qui sont d'autant moins calcaires qu'ils sont plus récents.

- Enfin de nombreux sols sont encroûtés, c'est-à-dire qu'ils présentent comme horizon d'accumulation du calcaire, une carapace : encroûtement, ou croûte et encroûtement, ou dalle, croûte et encroûtement, etc. Et assez souvent, comme dans les sols précédents, cette carapace est précédée d'un horizon où l'accumulation et l'individualisation du calcaire (amas et granules) se produisent déjà. Il arrive même, et ce n'est pas exceptionnel, d'avoir deux carapaces superposées et trois horizons d'accumulation du calcaire (figure n° 2). Au-dessus des carapaces, la teneur en calcaire des horizons supérieurs est très variable : ces horizons peuvent être totalement décalcarisés, ou au contraire être très calcaires ; ils peuvent être uniformément calcaires ou présenter un accroissement progressif de cet élément avec la profondeur.

* *

*

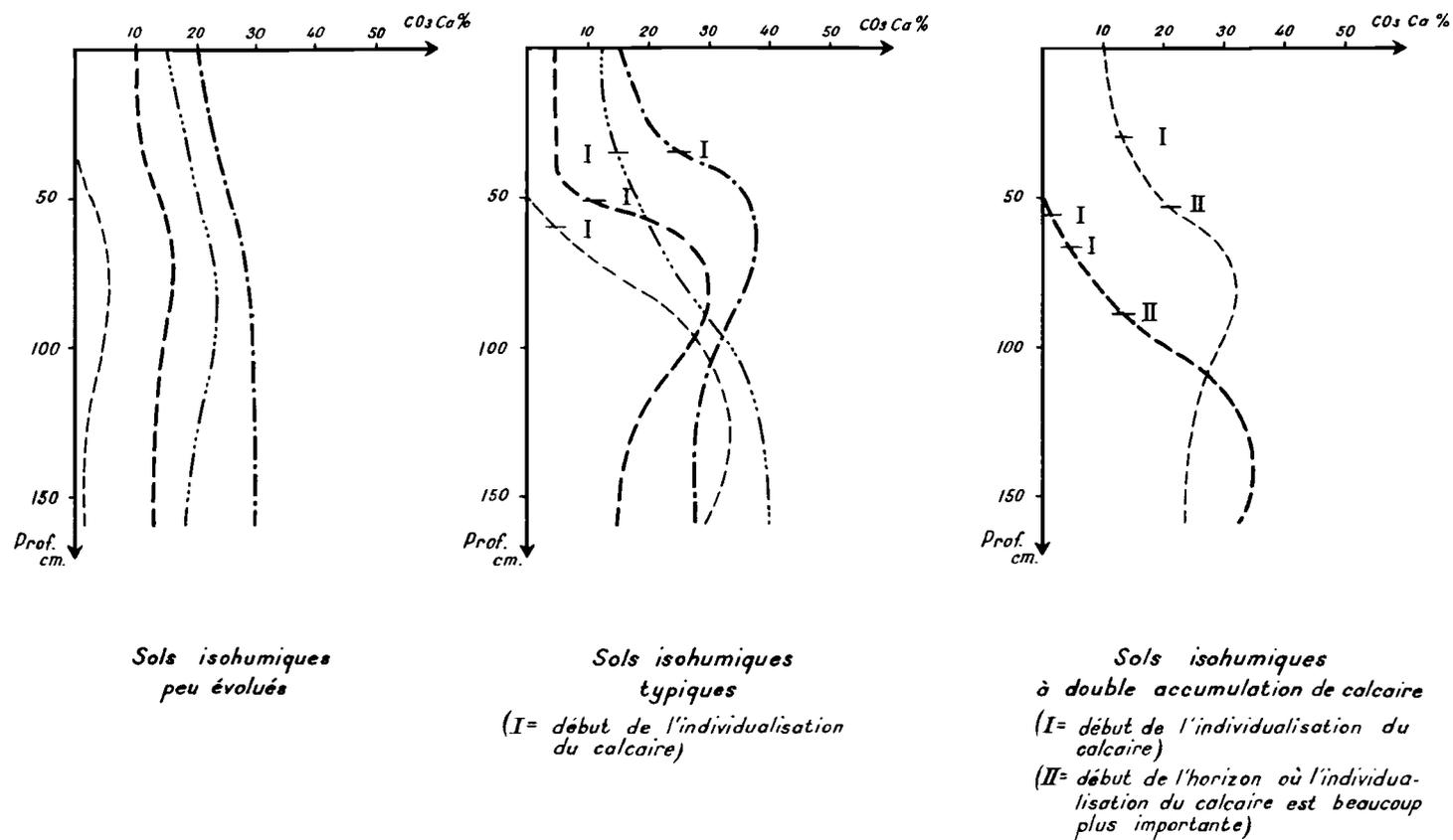


FIG. 1

Quelques exemples de profils calcaires des sols isohumiques (sols non encroûtés)

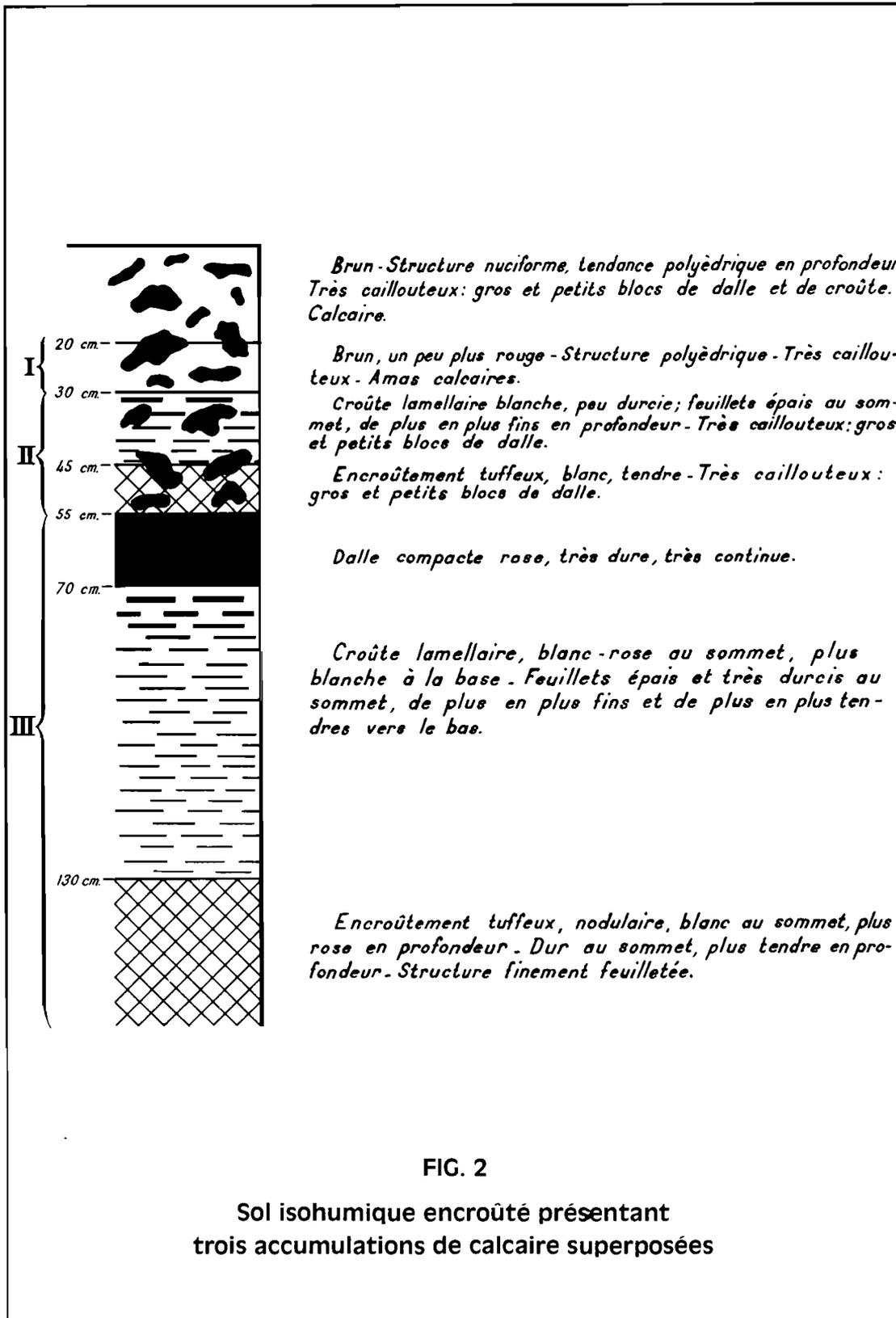


FIG. 2

Sol isohumique encroûté présentant
trois accumulations de calcaire superposées

Quelles sont maintenant les règles générales qui régissent les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols.

1 - POSITION ET ÉPAISSEUR DES HORIZONS

Les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire, quels qu'ils soient, ne sont jamais situés en surface, sauf s'il y a eu une érosion qu'il est toujours très facile de démontrer. En particulier, les carapaces calcaires que l'on trouve fréquemment sur des buttes, sur des plateaux totalement isolés, sur des pentes souvent assez fortes, sont presque toujours situées sous des horizons supérieurs de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur.

Par ailleurs, la profondeur à laquelle commencent les accumulations de calcaire est assez remarquablement constante dans une région donnée, à part, bien entendu, les zones d'accumulation et d'érosion récentes. D'une région à l'autre, l'épaisseur de l'horizon superficiel, horizon qui est bien sûr toujours moins calcaire que l'horizon d'accumulation de calcaire, peut varier, variation qui semble se faire en fonction du climat actuel ; mais cette variation reste toujours faible, 80 centimètres étant un grand maximum pour cet horizon superficiel. En Basse Moulouya, la profondeur à laquelle commencent l'individualisation et l'accumulation du calcaire est de 30 à 50 centimètres dans la plaine aride du Zebra, de 40 à 70 centimètres dans la plaine semi-aride des Triffa.

Enfin, si l'épaisseur des accumulations de calcaire varie nettement, mais relativement peu, en fonction du climat et du relief, si elle varie également d'une façon plus importante avec l'âge de sa formation, il reste que l'on n'observe jamais dans un sol d'âge déterminé des variations considérables de cette épaisseur.

Les horizons supérieurs qui dominent les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire n'apparaissent donc pas comme ayant recouvert ces derniers qui semblent bien s'être formés à l'intérieur du sol.

2 - RAPPORTS ENTRE LES HORIZONS SUPERFICIELS ET LES ACCUMULATIONS DE CALCAIRE

Deux séries d'observations très importantes doivent être soulignées :

a - Séparation des deux horizons

Le passage de l'horizon superficiel, moins calcaire, à l'horizon d'accumulation, obéit à des lois précises. Tout d'abord, dans un sol où l'accumulation du calcaire est diffuse, à amas, à granules ou à nodules, il y a, du haut vers le bas, augmentation progressive de la teneur en calcaire quand on passe d'un horizon à l'autre : on ne peut pas placer de limite précise. Puis, au fur et à mesure que latéralement on va vers des accumulations plus riches en calcaire (passages latéraux qui sont très progressifs), il apparaît que le passage entre les deux horizons devient de plus en plus net, que l'augmentation du calcaire est de plus en plus rapide, ceci étant dû au fait que c'est surtout le sommet de l'accumulation qui s'enrichit en calcaire. Et quand on passe aux carapaces, l'apparition de l'accumulation du calcaire devient brutale : il n'y a plus de transition, le sommet des carapaces étant toujours très net.

Cependant, les carapaces calcaires qui se terminent par une croûte, une dalle ou une pellicule rubanée, sont très souvent remaniées à l'intérieur de l'horizon superficiel, ce qui peut faire croire que cet horizon superficiel est un apport allochtone qui est venu recouvrir la carapace. En réalité, il semble qu'il s'agisse là d'un remaniement presque sur place, sans véritable transport. En effet :

- Quand on passe latéralement d'un sol à croûte à un sol à encroûtement, rapidement les horizons supérieurs ne contiennent plus de morceaux de croûte.

- Dans les horizons supérieurs, les morceaux de croûte qui ont été arrachés à la carapace et remontés jusqu'à la surface du sol (30 à 40 centimètres au-dessus de la croûte en place), peuvent être dans des positions assez inclinées mais ils ne sont jamais renversés. On voit d'ailleurs souvent des feuillets assez longs de croûte qui partent en oblique à travers l'horizon superficiel, depuis la carapace et vont quelquefois jusqu'à la surface du sol.

- Que l'horizon supérieur de la carapace soit une croûte ou un encroûtement, il est rare d'observer qu'il est raviné, ce qui serait probablement le cas si l'horizon superficiel du sol avait été mis en place postérieurement à la formation de la carapace.

b - Teneur en calcaire et épaisseur des deux horizons

Sur ce plan, les faits démontrent une indépendance presque totale entre les deux horizons. En effet :

- Il n'y a aucune corrélation entre la teneur en calcaire d'un horizon superficiel et la puissance (épaisseur et richesse en calcaire) de l'accumulation. Qu'il s'agisse d'un horizon à amas calcaires de 30 centimètres d'épaisseur ou d'une carapace de 2 mètres, l'horizon supérieur peut être non calcaire ou en contenir 20 à 30 %.

- De même, il n'y a presque aucune corrélation entre l'épaisseur de l'horizon supérieur et la puissance de l'accumulation. Tout juste constate-t-on, en Basse Moulouya par exemple, que les accumulations de calcaire sont un peu plus puissantes dans la cuvette des Triffa où justement, les horizons supérieurs sont un peu plus épais ; nous en reparlerons (voir paragraphe III - B - 6 et 7). Mais dans la plaine du Zebra comme dans la plaine des Triffa, l'épaisseur de l'horizon supérieur sera la même dans un sol à amas calcaires que dans un sol à carapace.

Une certaine contradiction semble donc apparaître entre les faits rapportés dans les paragraphes a et b, les premiers démontrant que les horizons superficiels et les horizons d'accumulation sont ceux d'un même sol et non deux dépôts différents, les deuxièmes tendant au contraire à prouver une indépendance entre les deux horizons. Nous verrons qu'en réalité il n'y a pas là contradiction, mais seulement la preuve que l'accumulation du calcaire n'est pas le résultat d'un lessivage vertical.

3 - RAPPORTS ENTRE LES ACCUMULATIONS DE CALCAIRE ET LES ROCHES-MÈRES

Dans les sols isohumiques, qui n'existent que sur des roches-mères très meubles (très généralement, il s'agit d'alluvions et de colluvions) et dans les sols rouges développés sur des matériaux meubles, on peut faire régulièrement les observations suivantes :

- Quel que soit le type d'individualisation et d'accumulation du calcaire, il y a toujours passage progressif entre cet horizon et la roche-mère, le calcaire diminuant progressivement, du haut vers le bas, depuis le maximum de l'accumulation jusqu'à la roche-mère. S'il s'agit d'une carapace calcaire, c'est son sommet qui est le plus riche en calcaire et le plus dur : les carapaces voient toujours leur teneur en calcaire et leur consolidation diminuer progressivement vers le bas, et la limite inférieure de ces carapaces, c'est-à-dire des encroûtements qui passent à des horizons à amas, granules ou nodules, est toujours très progressive.

- Il n'y a aucun rapport entre la richesse en calcaire de la roche-mère et la puissance des accumulations. En particulier, tous les types d'accumulation de calcaire peuvent se développer dans des roches-mères qui n'étaient pas calcaires lors de leur mise en place (schistes ou colluvions de schistes par exemple). Il y en a de beaux exemples en Basse Moulouya (piedmont des collines schisteuses des Kebdana en particulier). Cependant, un bassin versant calcaire, ou pour le moins calcaïque, reste bien entendu indispensable.

- Le matériau originel a certainement, par sa texture, une influence importante sur les formes que prennent les accumulations de calcaire : une granulométrie un peu grossière favorisera plutôt les granules, les nodules et les encroûtements nodulaires ; au contraire, dans un dépôt argileux,

on verra plutôt se former des amas friables et des encroûtements tuffeux. Par ailleurs, un matériel grossier favorise la formation d'encroûtement durcis, de croûtes et de dalles (dans et sur les roches-mères entièrement caillouteuses, il y a souvent un ou plusieurs niveaux de croûte mince et très dure, le reste du dépôt n'étant pas ou étant peu encroûté). Il ne s'agit pas là de lois générales, mais il est certain que sur le terrain on voit très souvent la morphologie des accumulations de calcaire se modifier très rapidement en fonction des variations de la texture des roches-mères. Par contre, nous n'avons pas observé, comme J. BOULAINÉ dans le Chélif (1957), de relations entre la texture et la perméabilité de la roche-mère d'une part, le lessivage du calcaire et la profondeur à laquelle ce calcaire s'accumule d'autre part (ceci pour des roches-mères dont la teneur en argile varie de 20 à 70 %, et la teneur en éléments inférieurs à 20 microns de 40 à 80 %).

L'individualisation et l'accumulation du calcaire, jusqu'à la carapace la plus dure, apparaissent donc bien comme s'étant formées dans un matériau préexistant : on ne peut pas, en particulier, imaginer qu'une croûte ou une dalle compacte sont des apports superposés au matériau sous-jacent. Cependant, il apparaît également que la roche-mère n'a pu contribuer que faiblement (ou pas du tout), par remontée du calcaire, à la formation des accumulations.

Dans les sols rouges développés sur une roche compacte, un calcaire dur par exemple, l'horizon d'accumulation de calcaire, quand il existe, se forme dans le sol et repose directement sur la roche-mère.

4 - CORRÉLATIONS VERTICALES ENTRE LES DIVERS HORIZONS D'INDIVIDUALISATION ET D'ACCUMULATION DU CALCAIRE

Il serait trop long de décrire toutes les corrélations possibles. Aussi sont-elles schématisées dans la figure n° 3. Nous rappellerons seulement que :

- Mis à part les phénomènes d'altération superficielle, la limite supérieure d'une carapace calcaire est toujours très nette, très brutale.

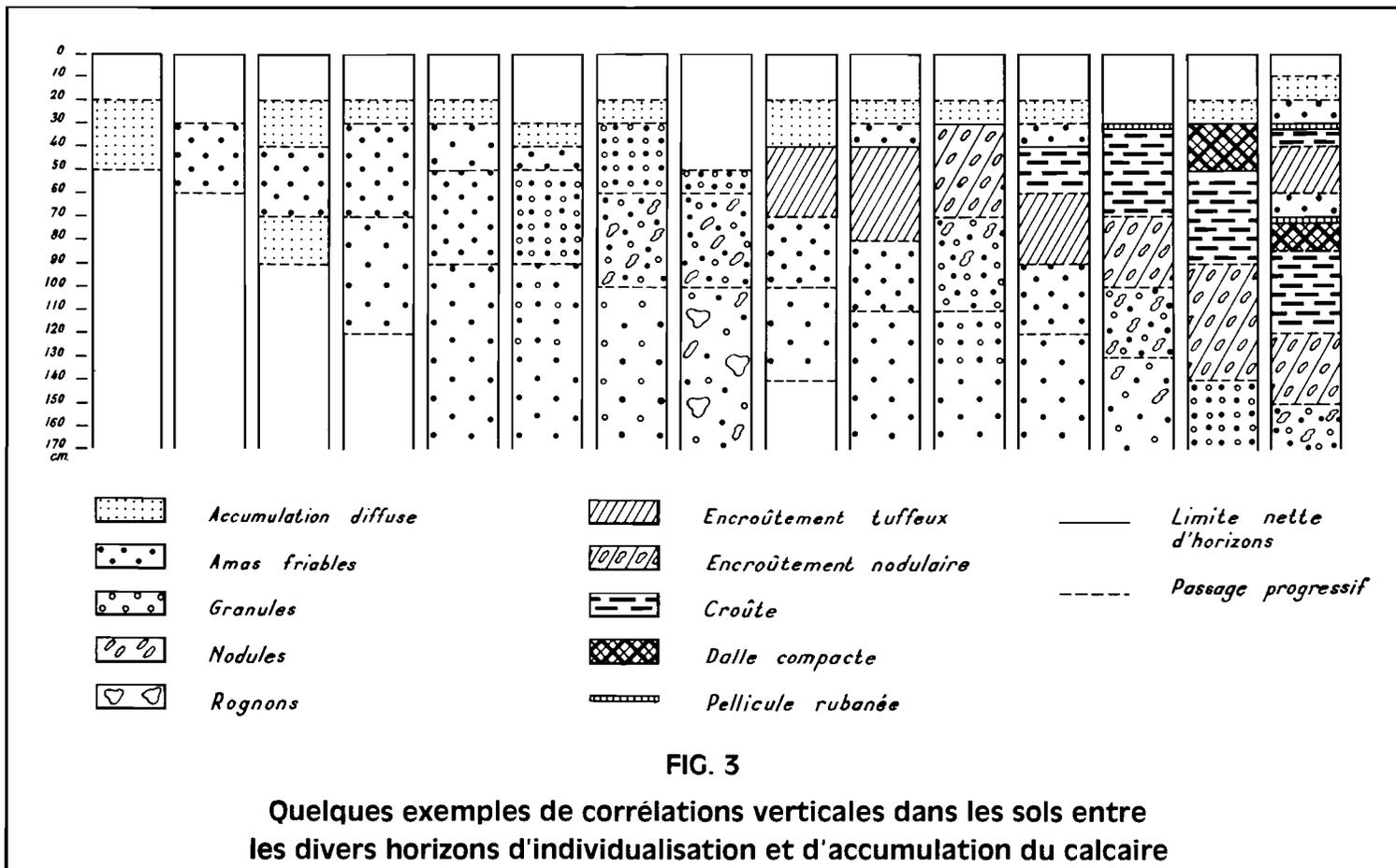
- Par contre, les limites des horizons qui la constituent, sauf pour la pellicule rubanée et quelquefois la dalle compacte, et sa limite inférieure sont toujours assez diffuses : ce sont des transitions progressives et il y a augmentation constante de la teneur en calcaire du bas vers le haut.

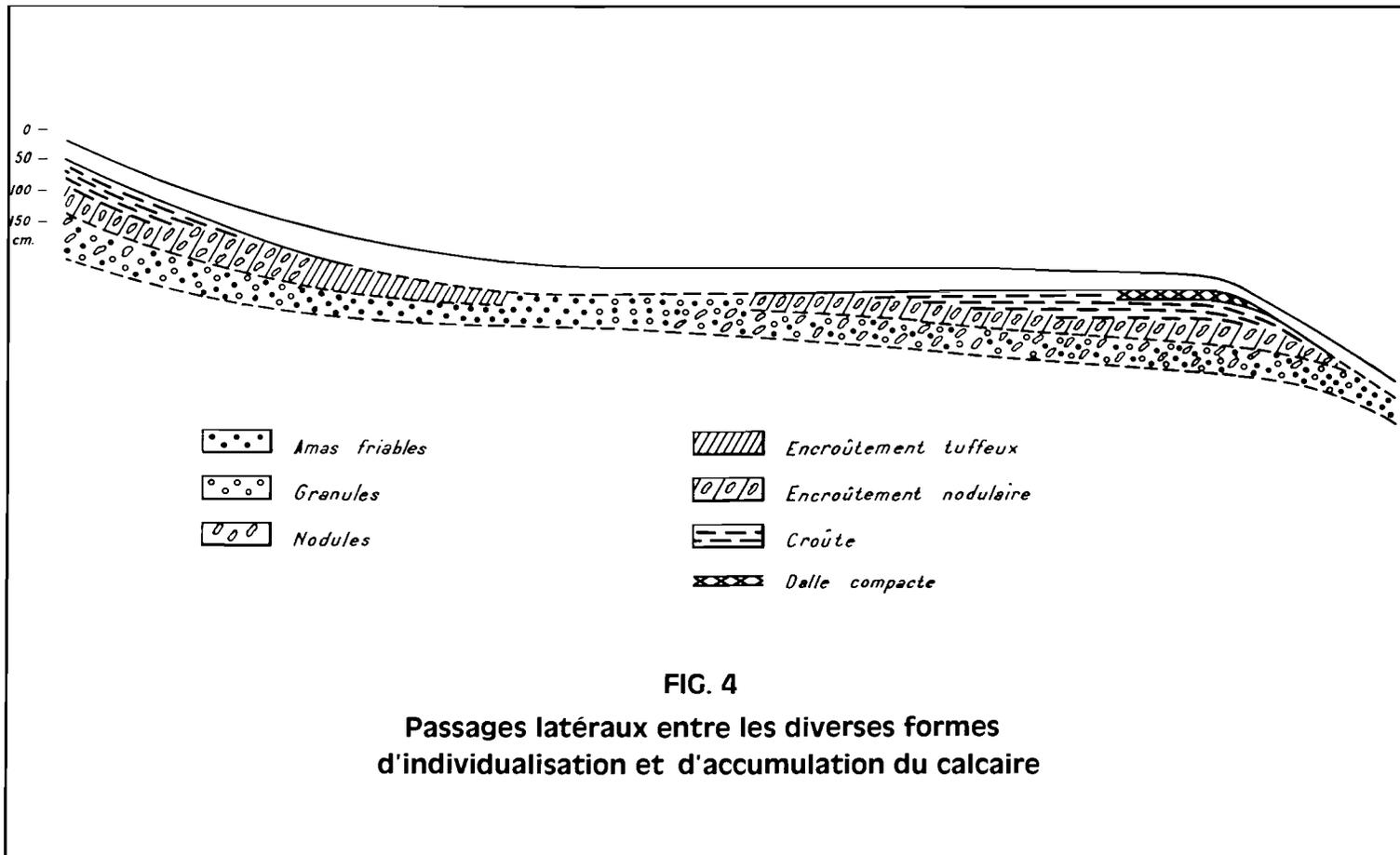
- Les limites supérieures et inférieures d'une accumulation diffuse ou d'une accumulation à amas, granules ou nodules sont généralement peu marquées, sauf bien entendu s'il y a eu superposition de dépôts quaternaires, qui sont alors souvent séparés par des niveaux à texture grossière, fréquemment caillouteux et ravinants.

- Il arrive assez souvent qu'une carapace soit surmontée par un horizon d'individualisation et d'accumulation moins puissantes (par exemple : horizon à amas sur encroûtement ou croûte ; encroûtement ou croûte sur dalle). Ce cas a déjà été envisagé : il est probable qu'il s'agit là de pédogénèses successives.

5 - CORRÉLATIONS LATÉRALES ENTRE LES DIVERS HORIZONS D'INDIVIDUALISATION ET D'ACCUMULATION DU CALCAIRE

Les passages latéraux entre les diverses formes d'individualisation et d'accumulation du calcaire sont extrêmement fréquents. Sur un dépôt tensifien, par exemple, dans des sols du groupe isohumiques subtropicaux, on passe couramment d'un horizon d'accumulation à amas, à un horizon à granules ; d'un horizon à amas, granules ou nodules à un encroûtement tuffeux ou nodulaire ; d'un encroûtement nodulaire à un encroûtement tuffeux ; d'un encroûtement à une croûte. Sur un dépôt moulouyen, on passe également fréquemment de la croûte à la dalle compacte. Et il s'agit bien là de passages latéraux et non de la superposition d'un encroûtement sur un horizon à amas ou concrétions, ou de la superposition d'une croûte sur un encroûtement. C'est ce qui a été schématisé dans la figure n° 4. Pour la pellicule rubanée, par contre, elle vient toujours se superposer d'une façon discontinue, sur un encroûtement durci, une croûte ou une dalle.





Dans une région donnée, l'apparition des diverses formes d'accumulation du calcaire, leur puissance, et les passages latéraux qui les relient sont essentiellement régis par les facteurs suivants : la texture des roches-mères, le relief et le micro-relief, l'âge des sols.

Mis à part les cas où les carapaces sont surmontées par des accumulations moins puissantes, les différentes formes d'accumulation et d'individualisation du calcaire apparaissent donc comme étroitement associées : nous avons vu que les accumulations diffuses, les amas friables, les granules et les nodules pouvaient être présents dans les mêmes horizons; par ailleurs, les passages verticaux et horizontaux démontrent que les encroûtements dérivent de ces horizons, que les croûtes dérivent des encroûtements et que les dalles compactes dérivent des croûtes ; seules les pellicules rubanées paraissent assez indépendantes, encore qu'on ne les trouve que sur les carapaces (ou sur des roches calcaires).

6 - LES INDIVIDUALISATIONS ET ACCUMULATIONS DU CALCAIRE EN FONCTION DE L'ÂGE DES SOLS ET DES CLIMATS ACTUELS

Quand on peut, d'après l'âge des dépôts quaternaires (1) sur lesquels ils se sont développés, fixer approximativement l'époque à laquelle les caractéristiques essentielles des sols se sont formées, on constate (en Basse Moulouya) :

- Sur les dépôts rharbiens, il n'y a souvent pas d'horizon d'accumulation. Quand il existe, il s'agit presque toujours d'une accumulation diffuse, sauf dans les secteurs les plus humides de la plaine des Triffa où quelques amas friables peuvent apparaître.

- Sur les dépôts soltaniens, l'horizon d'accumulation est généralement à amas friables ou, plus rarement, à granules ; les nodules sont très rares.

(1) Rappelons brièvement la chronologie du quaternaire marocain, telle qu'elle a été reprecisée récemment (BEAUDET, MAURER, RUELLAN, 1967) :

Glaciations européennes	Maroc	
	Niveaux eustatiques	Etages continentaux (pluviaux)
Subboréal	Mellahien Supérieur (Dunkerquien)	Rharbien
Würm	Mellahien Inférieur (Flandrien)	Soltanien
Riss	Ouljien	Tensiftien
Mindel	Anfatien	Amirien
Gunz	Maarifien	Salétien
?	Messaoudien	Regreguien
Villafranchien		Moulouyen Villafranchien inférieur

- Pour le Tensiftien, tous les cas sont possibles, sauf l'accumulation diffuse seule et la dalle compacte qui est rare. Les carapaces à encroûtements, croûtes et pellicules rubanées sont très fréquentes.

- A l'Amirien, dans la mesure où on peut le reconnaître, ce qui est souvent difficile, il semble que les carapaces soient rares ; l'accumulation caractéristique est faite d'amas friables.

- Au Salétien, il semble que la carapace calcaire puisse être assez développée.

- Enfin au Villafranchien (Moulouyen), c'est toujours la carapace très puissante, très épaisse (1 à plusieurs mètres), généralement terminée par une dalle compacte et une pellicule rubanée.

Au Maroc, les accumulations de calcaire existent partout, sous tous les climats, depuis l'humide jusqu'au saharien, à condition bien sûr qu'il y ait du calcaire dans les bassins versants (roches calcaires ou calciques), et dans l'ensemble du pays, cette échelle des accumulations de calcaire reste valable d'une façon relative, c'est-à-dire que c'est au Rharbien que les accumulations sont toujours les plus faibles et au Tensiftien et surtout au Villafranchien qu'elles sont les plus fortes.

Cependant, quand on va vers les régions plus humides, si les encroûtements restent présents à peu près partout, on constate une diminution progressive des croûtes et des dalles, puis leur disparition. Par contre, l'accumulation et l'individualisation du calcaire dans les sols soltaniens et rharbiens peuvent devenir plus importantes sans jamais cependant devenir des carapaces.

Inversement, quand on se dirige vers des régions plus arides, on assiste, tout d'abord, d'une part à une généralisation, dans les dépôts anciens, des carapaces calcaires et, en particulier, des croûtes, qui diminuent d'épaisseur et se rapprochent de la surface, mais qui peuvent se développer dans des dépôts amiriens ; d'autre part, dans les dépôts récents, rharbiens et soltaniens, à une diminution de l'importance de l'accumulation et de l'individualisation du calcaire. Puis quand on se rapproche du Sahara (Tafilalt par exemple), les accumulations de calcaire disparaissent des sols développés sur dépôts soltaniens et rharbiens et les carapaces calcaires deviennent moins développées dans les dépôts plus anciens : mais, contrairement à ce que certains auteurs ont affirmé (MARGAT, RAYNAL et TALTASSE, 1954), il y a encore des croûtes calcaires dans le Sud du Tafilalt.

Contrairement à l'âge des sols, le climat actuel apparaît donc comme n'ayant qu'une assez faible influence sur les accumulations de calcaire. Il existe cependant un certain rapport entre les deux, en particulier dans le domaine des formes et des puissances des accumulations, et des profondeurs auxquelles elles commencent. On peut citer à titre d'exemple la Basse Moulouya où, dans la cuvette des Triffa, plus humide, les accumulations de calcaire sont plus épaisses et commencent plus profondément que dans la plaine du Zebra, plus aride ; ceci peut être attribué :

- d'une part à l'intense décalcarisation qui a donné naissance aux sols rouges dans la chaîne des Bni-Snassène subhumide qui domine la plaine des Triffa ;

- d'autre part à la présence dans la cuvette des Triffa d'une végétation qui fut toujours mieux développée, plus profondément enracinée que dans la plaine du Zebra ;

- enfin à un certain lessivage vertical du calcaire, s'accroissant avec l'humidité et la fraîcheur, lessivage qui empêche que le calcaire amené par les eaux de ruissellement superficiel et par la circulation interne, s'accumule trop près de la surface.

Il faut cependant remarquer, et ceci est fondamental, que l'âge des sols et le climat n'ont pour ainsi dire aucune influence sur la décalcarisation des horizons superficiels qui surmontent les accumulations de calcaire.

Bien entendu, ce lessivage du calcaire est très difficile à juger : les horizons de surface ont pu être recalcarisés et surtout il apparaît par la présence des amas, granules et nodules, que les roches-mères n'ont plus du tout la teneur en calcaire qu'elles avaient lors de leur mise en place ; elles ont certainement dans la plupart des cas, été recalcarisées par la circulation des eaux.

Cependant, dans la plaine du Zebra, si les horizons de surface des sols bruns sont presque toujours un peu moins calcaires que la roche-mère, on constate que cette décalcarisation ne s'accroît absolument pas avec l'âge : il s'agit là d'un caractère acquis dès le Rharbien ancien. Il est en particulier remarquable que sur certains plateaux villafranchiens, qui sont isolés depuis le début du quaternaire, donc sur lesquels aucun nouvel apport latéral de calcaire n'a pu avoir lieu, les sols soient restés très calcaires dès la surface.

Dans la plaine des Triffa, beaucoup de sols (bruns et châtain) apparaissent très lessivés en calcaire : il s'agit cependant là d'une illusion due au fait que beaucoup de roches-mères n'étaient pas ou étaient peu calcaires lors de leur mise en place (il s'agit des colluvions de sols rouges formés dans les Bni-Snassène) (voir RUELLAN 1965, 1966). Quand les roches-mères sont calcaires, le lessivage n'apparaît plus que très faible. Cependant, on peut quand même noter que sur les dépôts calcaires du Rharbien, les horizons de surface étaient plus décalcarisés que dans la plaine du Zebra. Il semble donc que le lessivage vertical du calcaire joue plus fortement dans les Triffa, moins arides, que dans le Zebra.

7 - LES INDIVIDUALISATIONS ET ACCUMULATIONS DU CALCAIRE EN FONCTION DU RELIEF ET DU MICRO-RELIEF

Comme l'a très bien fait ressortir J. BOULAIN (1961), le relief et le micro-relief, souvent très mouvementés en Afrique du Nord, ont une très grosse influence sur la répartition des sols.

Sur les accumulations de calcaire, dans tous les domaines (épaisseur, profondeur, richesse en calcaire, morphologie, consolidation), cette influence se fait très largement sentir.

Tout d'abord, c'est en fonction de la topographie que se répartissent les roches-mères. En effet, le relief est le résultat de phénomènes d'érosion, de transport et d'accumulation, mais c'est lui également qui régit en partie ces phénomènes :

- C'est donc la topographie qui détermine une grande partie des propriétés physiques et chimiques des alluvions et colluvions, et en particulier la texture dont on a vu l'influence sur les accumulations de calcaire.

- La topographie régit également la répartition des dépôts d'âges différents (emboîtement des terrasses et des glacis par exemple), d'où son influence sur le degré d'évolution des accumulations de calcaire dont nous avons déjà parlé.

- Enfin le relief régit l'érosion des sols et leur fossilisation par de nouveaux dépôts. Il s'ensuit que les horizons d'accumulation de calcaire sont plus ou moins proches de la surface en fonction du relief. Il s'ensuit également tous les problèmes de superposition et de surimposition des pédogénèses.

Par ailleurs, c'est également le relief qui règle les mouvements de l'eau dans les sols, la quantité d'eau reçue par les sols, le sens et la vitesse de la circulation de cette eau (en fonction bien sûr également de la perméabilité des roches-mères et des sols).

La topographie devrait donc agir sur le lessivage du calcaire. En réalité, en Basse Moulouya, nous n'avons jamais remarqué que les sols situés dans les bas-fonds étaient moins calcaires en surface que les autres ou plus profondément décalcarisés. Cette dernière affirmation n'est pas tout à fait exacte : dans la cuvette des Triffa, les sols sont souvent non calcaires sur plus d'un mètre d'épaisseur, et dans les Ouled Mansour (collines séparant les Triffa de la Méditerranée), l'horizon décalcarisé est généralement d'autant plus épais que l'on se rapproche du fond d'un vallon ; mais il apparaît que ceci n'est pas dû au lessivage du calcaire, mais bien plutôt à l'accumulation, dans les bas-fonds, de matériaux non calcaires arrachés aux sols des versants, érosion et accumulation qui se poursuivent de nos jours. Dans le centre de la plaine du Zebra où tous les sols sont très calcaires dès la surface, il n'y a pas de relation entre cette teneur en calcaire de l'horizon de surface et le relief. On constate seulement un lessivage beaucoup plus accentué des sels et du sodium du complexe adsorbant (ce sodium étant remplacé par du calcium et du magnésium). Ceci prouve donc de nouveau que le lessivage vertical du calcaire ne joue presque pas dans la formation des accumulations de calcaire.

Par contre, on constate qu'il y a des relations très étroites entre la topographie et les accumulations de calcaire. On peut résumer ces relations de la façon suivante :

a - La profondeur à laquelle commence l'accumulation du calcaire est plus grande dans un bas-fond que sur une pente ou une colline ; il y a là l'influence des phénomènes d'érosion et d'accumulation postérieures, mais aussi peut-être le résultat d'une pénétration plus profonde des eaux qui apportent le calcaire.

b - Dans les sols qui se développent sur des dépôts récents (Rharbien en Basse Moulouya ; Rharbien et Soltanien dans les régions plus arides : Moyenne Moulouya en particulier), l'indivision et l'accumulation du calcaire n'apparaissent que dans les zones où les eaux de ruissellement superficiel et de circulation interne sont abondantes. Ce sont des zones qui reçoivent plus d'eau, donc plus de calcaire ; ce sont aussi des zones où la végétation, qui a certainement un rôle important dans la formation des accumulations de calcaire, est mieux développée, plus profondément enracinée.

c - Dans les sols plus anciens, en particulier dans ceux développés sur Tensiftien, époque à laquelle les carapaces calcaires ont pris une grande extension, l'épaisseur des accumulations de calcaire, leur richesse en calcaire et l'apparition des différentes formes de carapaces calcaires sont très liées au relief et au micro-relief :

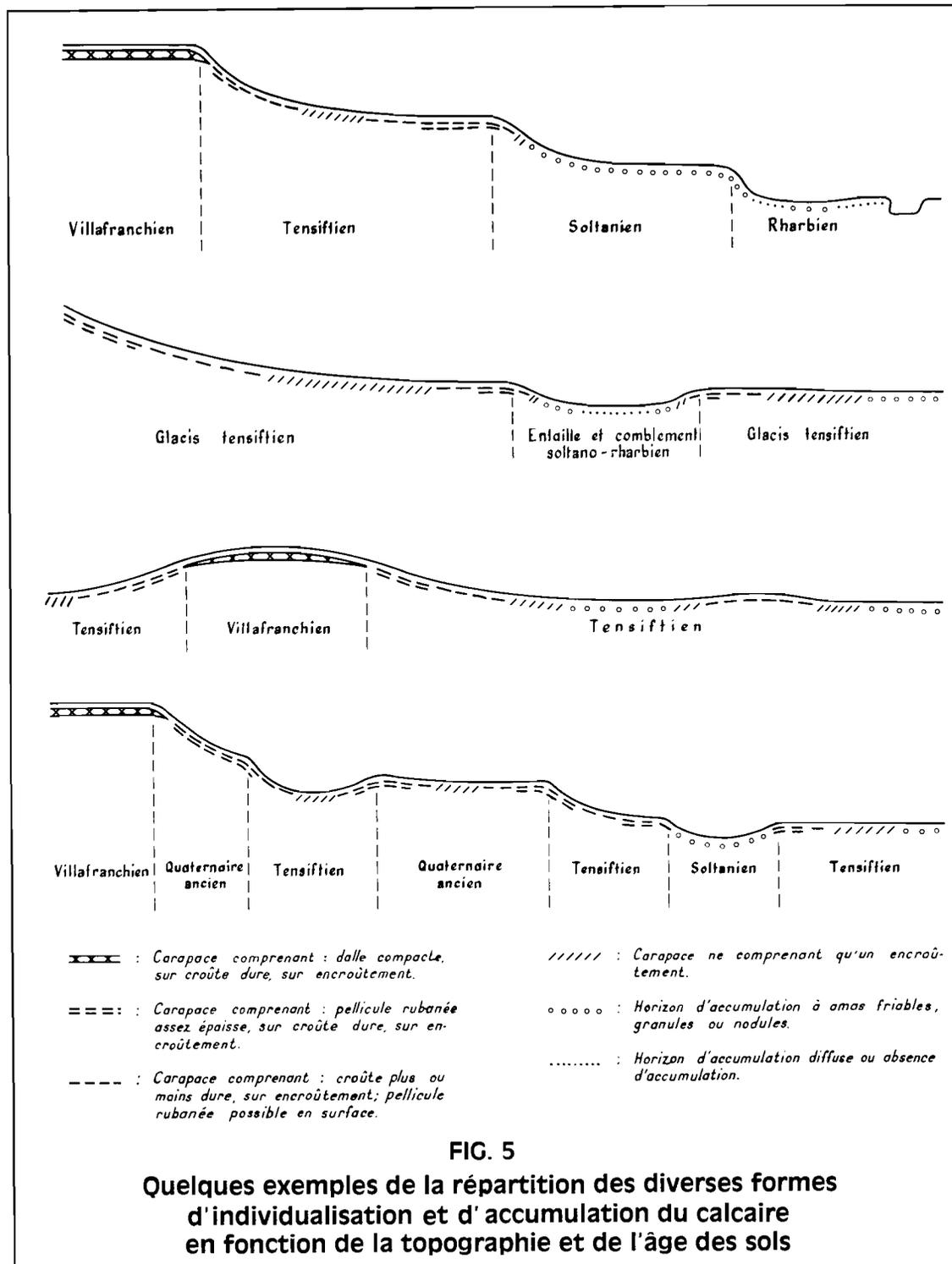
- Nous avons noté que dans la cuvette des Triffa les accumulations de calcaire sont beaucoup plus puissantes que dans la plaine du Zebra et dans le Zebra lui-même, ces accumulations (du Tensiftien) sont plus épaisses au pied de la chaîne des Kbdana que dans le centre de la plaine : tout ceci semble être le résultat de la présence des massifs montagneux. Présence des Bni-Snassène à climat subhumide, où l'existence des sols rouges sur calcaire dur démontre que des quantités énormes de calcaire ont été solubilisées par les eaux, puis transportées par ruissellement et surtout probablement par circulation interne (circulation diffuse ou en nappe phréatique), enfin accumulées dans les sols des Triffa à une profondeur qui dépend à la fois du lessivage vertical qui empêche le calcaire de s'accumuler en surface, de la perméabilité et surtout probablement de l'enracinement de la végétation qui, par évaporation et phénomènes d'oxydo-réduction, provoque la précipitation du calcaire (J. BOULAIN, 1957). Présence également de la chaîne des Kbdana où la décalcarisation des sols est beaucoup moins poussée (climat nettement plus aride que dans les Bni-Snassène), qui a donc fourni à la plaine du Zebra beaucoup moins de calcaire, calcaire qui s'est surtout déposé au pied de la chaîne.

- Dans les plaines elles-mêmes, le micro-relief règle l'accumulation du calcaire. En Basse Moulouya, on peut trouver les divers types d'accumulation dans presque toutes les positions topographiques, mais il est évident que c'est le micro-relief qui régit le passage d'un type d'accumulation à l'autre, qui régit également dans le détail la puissance (épaisseur et teneur en calcaire) de ces accumulations. C'est ce qui a été schématisé sur la figure n° 5 : ce schéma semble bien démontrer que c'est la circulation latérale des eaux sur et dans les sols, ce que l'on appelle le "lessivage oblique", qui régit les accumulations de calcaire : tout semble dépendre de la quantité d'eau chargée en carbonate qui arrive, de la vitesse à laquelle cette eau peut circuler et de la vitesse à laquelle elle peut s'évaporer. Les accumulations de calcaire apparaissent comme étant le résultat d'un apport latéral de calcaire et non pas d'un lessivage vertical.

8 - OBSERVATIONS DIVERSES

Il reste encore à souligner quelques faits importants :

a) Nous n'avons pas pu, comme J.H. Durand, faire d'étude sur l'association des minéraux lourds dans les accumulations de calcaire et les horizons qui les entourent. Il est cependant très fréquent de voir des graviers et cailloux dans les encroûtements, croûtes et dalles, les mêmes que ceux que l'on trouve dans les horizons situés au-dessous et au-dessus.



b) L'accumulation du calcaire apparaît souvent comme s'étant faite et se faisant encore autour d'un système racinaire. Nous avons fait dans ce domaine les mêmes observations que J. BOULAIN. En particulier, le grand axe des amas, granules et nodules est souvent proche de la verticale, et ces inclusions sont souvent alignées verticalement.

c) Les amas calcaires n'apparaissent pas seulement comme des nodules farineux, aux contours bien délimités, ou comme des pellicules ; très souvent, il s'agit d'une sorte de pénétration diffuse du calcaire à l'intérieur des agrégats, et on voit côte à côte des agrégats qui sont plus ou moins fortement imprégnés de calcaire, ce type d'amas étant lui-même étroitement associé dans les horizons à ceux qui sont mieux délimités et beaucoup plus purs. En outre, la présence d'amas friables n'implique pas forcément une accumulation du calcaire.

d) Enfin dans les sols, les horizons d'accumulation, en particulier ceux à amas, présentent souvent des traces d'hydromorphie : coloration bigarrée du jaune au rouge, patines ferrugineuses ou de manganèse, structures à faces lissées, poches d'argile.

* *

*

De l'ensemble des faits que nous venons de rapporter sur les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les différentes formes d'accumulation du calcaire, dans les dépôts et surtout dans les sols, n'étant absolument pas indépendantes les unes des autres, on ne peut imaginer pour chaque type, des modes de formation totalement différents et complètement décalés dans le temps.

- Les accumulations de calcaire des sols n'étant pas indépendantes des horizons qu'ils surmontent et qui les surmontent, il ne peut s'agir du résultat de phénomènes de dépôts ou de ruissellement superficiel. Ces accumulations apparaissent comme un horizon pédologique, formé à l'intérieur des sols à une profondeur assez faible et qui varie peu.

- Cependant, le processus pédologique principal qui a donné naissance à ces accumulations, dans les sols et par surcroît dans les dépôts, ne peut être le lessivage vertical du calcaire à partir des horizons superficiels. Ce lessivage n'est pas nul, mais il reste toujours très faible ; il semble d'ailleurs qu'il s'agisse d'une caractéristique qui est acquise très rapidement (en quelques milliers d'années, puisque les sols du Rharbien l'ont déjà), puis qui n'évolue plus ; un équilibre est probablement atteint, équilibre entre la descente et la remontée des solutions qui peuvent transporter le calcaire.

- Ce processus pédologique ne peut pas non plus être la remontée d'un calcaire qui serait uniquement fourni par la roche-mère.

- Si le calcaire ne vient ni du haut ni du bas, c'est qu'il est apporté latéralement. Apport latéral par ruissellement superficiel puis pénétration dans le sol, l'eau déjà chargée en calcaire traversant les horizons supérieurs en ne les lessivant que très peu ou pas du tout. Apport latéral dans le sol et dans les dépôts par circulation diffuse, et par des nappes phréatiques plus ou moins abondantes. Le dépôt du calcaire, la morphologie de ce dépôt, l'épaisseur et la profondeur des accumulations sont alors le résultat de la quantité d'eau et de calcaire qui peut être apportée, de la vitesse à laquelle l'eau peut circuler, de la vitesse à laquelle elle peut s'évaporer, de la profondeur à laquelle l'eau venant de la surface peut pénétrer dans le sol, de la quantité d'eau qui peut remonter des horizons profonds, de l'importance de l'hydromorphie et de ses variations. D'où le rôle essentiel de la texture et de la perméabilité des roches-mères et celui de la topographie. D'où le rôle également fondamental de la végétation qui facilite la pénétration de l'eau dans le sol et surtout, qui est la pompe aspirante absorbant l'eau qui vient de toute part, et qui concentre le calcaire autour de son système racinaire.

4 - ESSAI D'INTERPRÉTATION DE LA FORMATION DES INDIVIDUALISATIONS ET ACCUMULATIONS DE CALCAIRE DANS LES SOLS ET LES DÉPÔTS

A - Formation dans les dépôts quaternaires

Il semble qu'il s'agit là probablement du résultat de variations d'hydromorphie plus ou moins accentuées, hydromorphie qui remanie à la fois le calcaire préexistant dans les dépôts et celui qui est amené par la circulation des eaux.

Suivant les cas, on peut penser :

- Soit à des dépôts calcaires très humides lors de leur mise en place, l'individualisation du calcaire se produisant pendant l'assèchement en même temps que la structuration ; nous rejoignons une hypothèse déjà présentée par J.H. DURAND pour les "nodules farineux".

- Soit à des circulations d'eau, plus ou moins diffuses et intermittentes, qui affectent, en fonction des données topographiques et texturales, l'ensemble du dépôt ou seulement certains niveaux de ce dépôt.

- Soit enfin à l'action d'une nappe phréatique à niveau variable, l'accumulation et l'individualisation du calcaire se produisant dans la zone de battement de cette nappe.

La morphologie et l'importance des accumulations et individualisations du calcaire dans les dépôts sont donc fonction à la fois de l'importance de l'hydromorphie qui semble cependant rester toujours assez faible, de la quantité de calcaire préexistant dans le dépôt et apporté par les eaux qui circulent, de la vitesse à laquelle ces eaux circulent, de la cadence à laquelle le dépôt peut s'humidifier et s'assécher. On peut en particulier penser que la formation d'amas calcaires est le résultat d'une hydromorphie qui varie assez peu et lentement ; que les granules, nodules et rognons sont au contraire les témoins d'une hydromorphie peut-être plus poussée, mais surtout d'une variation rapide et importante de cette hydromorphie par des eaux qui apportent beaucoup de calcaire ; que les encroûtements et les croûtes qui ne se développent que dans des horizons à texture grossière, caillouteux, témoignent d'une circulation abondante et rapide des eaux calcaires dans un milieu qui peut s'assécher assez brutalement.

Dans l'ensemble, il s'agit certainement là de phénomènes très lents, et beaucoup d'entre eux, qui ont donné naissance à des faciès caractéristiques et généralisés (amas de l'Amirien, granules et nodules du Tensiftien) sont essentiellement fossiles, témoignant d'un milieu humide qui a aujourd'hui disparu. Mais partout où les dépôts peuvent encore s'humidifier, partout où il y a des nappes phréatiques temporaires, il est très probable que les phénomènes continuent actuellement.

B - Formation dans les sols (sols isohumiques et sols rouges)

Les faits exposés précédemment conduisent à l'ensemble des conclusions suivantes :

1° Le calcaire provient essentiellement d'apports latéraux. Il s'agit d'eaux chargées en calcaire qui, soit ruissellent sur le sol avant d'y pénétrer, soit circulent dans le sol et dans la roche-mère. Comme l'ont récemment montré G. DELIBRIAS et P. DUTIL (1966) un bassin versant à roches calcaires n'est pas indispensable : des roches calciques et en particulier des basaltes peuvent fournir suffisamment de calcium pour enrichir les eaux en calcaire.

2° Les eaux superficielles, quand elles ne sont pas saturées en calcaire, c'est-à-dire quand elles proviennent de pluies tombées localement et qui pénètrent dans le sol presque immédiatement, ou quand elles ont circulé sur des matériaux peu calcaires, peuvent provoquer un certain lessivage vertical du calcaire dans les horizons supérieurs ; par ailleurs, il est certain que la présence de matière organique dans les horizons supérieurs provoque un enrichissement de l'eau en gaz carbonique et peut-être aussi en composés organiques, qui vont lui permettre de dissoudre encore du calcaire

appartenant à ces horizons supérieurs. Le lessivage vertical sera donc d'autant plus important que le climat est moins aride, plus pluvieux et moins chaud. En pays aride et semi-aride, c'est-à-dire dans les régions où on trouve les sols isohumiques, il reste cependant toujours très limité, probablement parce que les horizons supérieurs sont constamment réapprovisionnés en calcaire par les eaux qui y circulent (le rôle de l'activité biologique reste à étudier).

3° Les eaux qui circulent dans le sol ne proviennent pas forcément toutes de très loin. Comme l'a précisé P. BIROT (1964), les eaux de pluies qui pendant l'hiver n'ont pas été utilisées par les plantes et qui ont donc pu percoler profondément dans le sol, peuvent ensuite remonter par capillarité vers le système racinaire après s'être enrichies en calcaire à tous les niveaux. Il n'y a cependant pas appauvrissement en calcaire de la roche-mère qui est constamment réapprovisionnée par les apports latéraux.

4° Les apports latéraux de calcaire dans le sol, en dehors des ruissellements superficiels, sont dus, soit à des circulations assez diffuses, soit à des nappes phréatiques.

5° L'accumulation du calcaire peut commencer dès que la végétation s'installe sur un nouveau dépôt : cette accumulation se fait au niveau du système racinaire qui absorbe l'eau provenant de toute part, et provoque la précipitation du calcaire. Etant donné l'épaisseur des accumulations de calcaire et la profondeur à laquelle elles se situent, le système racinaire doit être en partie celui d'une végétation d'arbres et d'arbustes.

6° L'accumulation du calcaire commence toujours par une accumulation diffuse et par des pseudo-mycéliums.

7° Le stade suivant de l'accumulation est l'apparition d'amas calcaires. Cependant, dans un dépôt calcaire et dans une zone où les apports latéraux sont limités, l'individualisation du calcaire sous forme d'amas peut précéder son accumulation.

8° En fonction des quantités d'eau et de calcaire qui peuvent être amenées jusqu'au système racinaire, en fonction également de la vitesse à laquelle peuvent se faire la circulation et l'évaporation de l'eau au niveau des racines, l'accumulation va se concrétionner plus ou moins et se développer plus ou moins vite. La densité, l'individualisation et la grosseur des amas, l'apparition de granules et nodules plus ou moins durs, plus ou moins gros et plus ou moins nombreux, l'épaisseur de ces horizons d'accumulation dépendent de ces facteurs, c'est-à-dire qu'ils dépendent de la quantité d'eau et de calcaire qui peut provenir du bassin versant (climatologie et géologie de ce bassin versant), des propriétés hydriques des roches-mères qui peuvent s'humidifier et s'assécher plus ou moins rapidement, du relief et du microrelief qui règlent la circulation de l'eau, de la puissance du système racinaire.

9° La profondeur à laquelle commencent ces accumulations dépend de la quantité d'eau qui percole verticalement, c'est-à-dire de la topographie, de la perméabilité et du climat local. Plus cette quantité est grande et plus l'accumulation commencera profondément.

10° Si les conditions climatiques générales le permettent pendant un temps suffisamment long, le processus d'accumulation du calcaire se poursuivra, et les encroûtements commenceront bientôt à se former à partir des horizons à amas, granules et nodules. C'est, bien entendu, dans les zones les plus favorisées, qui reçoivent beaucoup d'eau et qui peuvent s'assécher rapidement, que les encroûtements apparaîtront les premiers et se développeront le plus rapidement.

11° La formation préférentielle d'un encroûtement tuffeux ou nodulaire doit dépendre essentiellement de l'accumulation préexistante et des conditions d'humidification et d'assèchement.

12° Au fur et à mesure que l'encroûtement se développe, la stérilité chimique de cet horizon et sa compacité obligent l'enracinement à être de plus en plus superficiel. Par ailleurs, cet encroûtement s'engorgeant facilement et la perméabilité diminuant, la circulation de l'eau devient de plus en plus superficielle : l'accumulation du calcaire se poursuit mais elle n'affecte plus que des horizons de plus en plus superficiels de l'encroûtement.

13° L'enrichissement en calcaire de cet horizon supérieur de l'encroûtement, horizon qui, étant donné sa proximité de la surface du sol et de l'enracinement, s'engorge et s'assèche rapidement, va bientôt s'accompagner d'un certain durcissement puis d'un début de feuilletage plus ou moins horizontal : c'est la croûte qui se forme. Selon le temps, le climat, la topographie et les propriétés de l'encroûtement, ces alternances d'humidification et d'assèchement seront plus ou moins rapides, agiront pendant un temps plus ou moins long, affecteront une épaisseur plus ou moins grande de l'encroûtement : il en résultera que le durcissement de l'encroûtement et la formation des feuilletés de croûte seront plus ou moins accentués sur une épaisseur plus ou moins grande ; il en résultera également des variations dans l'épaisseur, le durcissement et la richesse en calcaire des feuilletés de croûte.

14° L'aboutissement extrême de ces phénomènes d'humidification et de dessiccation semble être la formation de la dalle compacte. Cette dalle compacte, très généralisée au Villafranchien, ne s'est formée qu'assez rarement au Tensiftien.

15° Enfin, au sommet de la croûte calcaire durcie ou de la dalle, imperméable mais toujours enterrée, plus ou moins brisée verticalement par les dernières phases d'assèchement, l'eau qui pénètre de plus en plus difficilement, ruisselle et s'évapore en déposant de fines lamelles de calcaire : c'est la formation de la pellicule rubanée.

16° En fonction des divers facteurs de formation que nous avons cités, et surtout en fonction du temps, l'ensemble de ces phénomènes s'est répété d'une façon plus ou moins accusée au cours de chacune des périodes de pédogénèses qui se sont succédées pendant le quaternaire, périodes de pédogénèses correspondant probablement le plus souvent aux périodes pluviales (G. BEAUDET, G. MAURER, A. RUELLAN, 1966).

17° Si l'accumulation du calcaire jusqu'à la formation des encroûtements semble normale, quand le temps l'a permis, sous un climat semi-aride voisin de celui de la plaine des Triffa (avec sa végétation forestière actuelle), il est possible que le durcissement des encroûtements, et la formation des croûtes, des dalles et des pellicules rubanées soient la conséquence d'une certaine modification climatique, que l'on imagine facilement dans le sens de l'assèchement (les croûtes sont rares dans les régions actuellement trop pluvieuses ; elles sont au contraire très généralisées dans les régions actuellement subarides comme la Moulouya et les Hauts Plateaux). Il ne peut s'agir cependant d'une augmentation importante de la sécheresse et il est peut-être plus logique de penser à une modification du rythme des précipitations et des températures, à un climat toujours aussi pluvieux mais plus chaud, peut-être à un déplacement de la saison des pluies vers la saison chaude. Mais n'y a-t-il pas tout simplement modification seule du pédoclimat, modification qui provient de la dégradation de la végétation naturelle provoquée par la formation des encroûtements ?

18° La formation des encroûtements et des croûtes à l'intérieur des sols pose bien entendu le problème du déplacement des particules non calcaires qui sont remplacées par le calcaire. Jusqu'à des teneurs de 50-60 % de calcaire, il peut n'y avoir qu'augmentation de la densité de l'horizon. Mais au-delà il y a eu forcément déplacement des particules, probablement sous l'action d'une certaine cristallisation. Ce phénomène reste cependant à étudier au laboratoire.

19° Depuis la formation des dernières carapaces calcaires qui datent le plus souvent du Tensiftien, jusqu'à nos jours, ces sols ont continué à évoluer.

- Tout d'abord, rien n'interdit de penser par exemple que des carapaces, essentiellement constituées au Tensiftien, ont continué à évoluer jusqu'à nos jours : on peut même imaginer qu'une forte accumulation à granules du Tensiftien a pu se transformer en encroûtement au cours du Soltanien, qu'un encroûtement formé au Tensiftien a pu se transformer en croûte au Soltanien, que des pellicules rubanées se sont développées au sommet des carapaces jusqu'à nos jours.

- Cependant, à partir du moment où une carapace calcaire est formée, surtout s'il s'agit d'une croûte ou d'une dalle, carapace qui limitera l'enracinement de la végétation et les échanges hydriques, il se produit certainement une sorte de rupture dans le sol qui isole l'horizon superficiel : cet horizon ne va plus évoluer en fonction de sa roche-mère qui est située sous la carapace, mais seulement en fonction de lui-même et de la carapace qu'il surmonte.

- En présence d'un profil à carapace calcaire, il faut d'ailleurs en ce qui concerne l'horizon supérieur, se poser toujours deux questions ; première question : quelle est l'évolution géomorphologique de cet horizon depuis la formation de la carapace ; cet horizon n'est-il pas un apport postérieur, n'a-t-il pas été aminci ou épaissi par des phénomènes d'érosion et d'accumulation, est-il vraiment "en place" ; deuxième question : quelle est l'évolution pédologique de cet horizon depuis la formation de la carapace ?

- La réponse à la première question est toujours difficile et l'observation seule des profils pédologiques n'apporte jamais les éléments suffisants : cette observation doit toujours être complétée par une étude géomorphologique détaillée. Il faut en particulier rappeler un point important : ce n'est pas parce que, dans les horizons supérieurs d'un sol à carapace calcaire, on trouve des éléments de cette carapace (croûte et dalle) qu'il faut en déduire que cet horizon est un apport postérieur ayant remanié, érodé la carapace en se mettant en place. Il peut s'agir d'un simple remaniement sur place accompagné de glissements très légers et très lents des différents niveaux de cet horizon ; comme l'a si bien écrit récemment G. BEAUDET (1966) "La stabilité n'est pas l'immobilité. De multiples causes provoquent un réaménagement perpétuel des particules du dépôt : variations différentielles de volume liées à l'état hydrique et thermique du sol, activité des animaux fouisseurs, passage de l'eau de percolation, implantation, croissance et décomposition des racines. Tous ces mêmes réajustements se traduisent globalement par une lente migration du dépôt sur la pente". "La pédogénèse s'exerce donc dans un milieu lentement mouvant où parfois tel horizon (mieux humecté, plus gonflant ou recélant une vie animale ou végétale plus active par exemple) s'avère un peu plus "rapide" que les autres. Aussi ne faut-il pas s'étonner de trouver dans les profils pédologiques de ces régions à végétation climatique dense des pseudo-discordances, des "ravinements" fugitifs qu'un observateur non averti des processus morphologiques peut interpréter comme autant d'apports colluviaux distincts et superposés". Nous pensons en tout cas que les sols à carapace calcaire dans lesquels l'horizon supérieur est entièrement un apport postérieur sont assez rares, et les positions topographiques occupées par de nombreux sols à carapace calcaire démontrent que ces apports étaient souvent impossibles. Par contre, ces horizons, suivant leur situation dans le relief, ont très certainement été souvent amincis ou épaissis depuis que les carapaces ont pris naissance : l'état de la surface, souvent enrichie en éléments grossiers, et des modifications brutales de texture dans le profil, le démontrent.

- L'évolution pédologique de l'horizon supérieur depuis la formation de la carapace dépend principalement de deux facteurs : l'épaisseur de l'horizon et la nature de la carapace. Si cet horizon est suffisamment épais (plus de 30 centimètres), nous avons déjà montré que, par exemple, un nouveau sol isohumique peut s'y développer, et même, sur des carapaces villafranchiennes, de nouveaux sols à carapace peuvent prendre naissance. Par contre, si cet horizon est peu épais, ou si la carapace est un encroûtement ou une croûte tendre qui s'altère assez facilement et que le système racinaire peut pénétrer sans trop de difficultés, le sol évoluera plutôt comme un sol brun calcaire ou une rendzine. On est d'ailleurs souvent amené, étant donné que les carapaces sont fréquemment assez fortement disloquées en surface, à se demander dans quelle mesure l'horizon supérieur ne s'est pas en partie reformé par altération de la carapace. Il semble cependant, puisque les carapaces n'apparaissent que rarement vraiment tronquées et que les horizons supérieurs des sols à carapace passent latéralement aux horizons supérieurs des sols non encroûtés, que ce phénomène soit limité : il y a bien dégradation de l'horizon supérieur de la carapace, mais c'est la dislocation physique qui domine, la dissolution chimique ne pouvant qu'altérer un peu les encroûtements et émousser les morceaux de croûtes et de dalles.

CONCLUSION

En guise de conclusion, il paraît nécessaire de souligner tout le travail qui reste à faire dans ce domaine de l'accumulation du calcaire dans les sols méditerranéens.

Travail de terrain tout d'abord, et il s'agit essentiellement d'intensifier les études détaillées : descriptions très précises des profils de sols et des formes d'accumulation dont la classification pourrait être beaucoup plus diversifiée que celle que nous avons proposée ; cartographies géologiques, géomorphologiques et pédologiques méticuleuses qui permettraient de mieux connaître les rapports existant entre les diverses formes d'accumulation et le rôle des roches-mères, du relief, de l'âge dans leur genèse.

Mais aussi travail de laboratoire qui a été jusqu'à présent très négligé : analyses chimiques et physiques détaillées, étude des minéraux lourds (déjà entreprise par J.H. DURAND), observations microscopiques, datations absolues, etc. Tout ceci apporterait certainement des éléments précieux pour l'interprétation de ces formations.

Enfin, il reste aussi à faire de la pédologie expérimentale en laboratoire, sous la forme d'essais qui, au départ, ne seraient pas très compliqués à imaginer et qui chercheraient à provoquer la formation des accumulations. Un peu de matériel et beaucoup de patience seraient les seules exigences d'un tel travail.

Tous ces éléments permettraient certainement une meilleure interprétation de ces formations pour lesquelles on doit pour l'instant se contenter d'hypothèses qui ne peuvent être solidement fondées.

BIBLIOGRAPHIE

- AGAFONOFF (V.) - 1935-1936 - Sols types de Tunisie. Ann. Serv. bot. agron. Tunisie, t. XII-XIII, pp. 41-413.
- AUBERT (G.) - 1947 - Les sols à croûtes calcaires. Conf. Pédol. méditer. 1947, Alger-Montpellier, pp. 330-332.
- AUBERT (G.) - Cours de pédologie de l'ORSTOM (non publié).
- AUBERT (G.) - 1960 - Les sols de la zone aride : étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. In : Les problèmes de la zone aride. Actes du colloque de Paris. Unesco. Recherches sur la zone aride, XVIII. Paris, pp. 127-150.
- AVELLANO (A.R.V.) - 1953 - Barrilaco pedocal, a stratigraphie marker Ca. 5000 BC. and its climatic significance. Congr. Géol. int. 19. 1947, Alger, C.R. Sect. VII, pp. 53-73.
- BEAUDET (G.), JEANNETTE (A.), MAZEAS (J.P.) - 1964 - Les dépôts quaternaires du Bas Tensift, (Maroc occidental). Etude géologique et morphologique. Rev. Géogr. Maroc, n° 5, pp. 35-61.
- BEAUDET (G.), MAURER (G.), RUELLAN (A.) - 1967 - Le Quaternaire marocain. Observations et hypothèses nouvelles. Rev. Géogr. phys. géol. dyn., vol. IX, fasc. 4, pp. 269-310.
- BEAUDET (G.) - 1966 - Le cadre géomorphologique de la pédogenèse au Maroc. In : Congr. Pédol. méditer. 1966. Madrid. Excursion au Maroc. Livret-guide, t. I. Le milieu marocain, pp. 1-24. multigr.
- BIROT (P.), DRESCH (J.) - 1964 - La Méditerranée et le Moyen-Orient, t. I. La Méditerranée occidentale. P.U.F., Paris, VIII-552 p.
- BLAKENHORN - Cité par AGAFONOFF V. (1935-1936).
- BOULAIN (J.) - 1957 - Etude des sols des plaines du Chélif. Serv. Et. sci., Alger, 582 p.
- BOULAIN (J.) - 1958 - Sur la formation des carapaces calcaires. Accumulation de carbonates et de sulfates dans des sols bien drainés. Publ. Serv. Carte géol. Algérie (nouv. sér.), Bull. n° 20, pp. 7-19.
- BOULAIN (J.) - 1960 - Sur quelques sols rouges à carapace calcaire. Bull. Ass. fr. Et. Sol, n° 3, pp. 130-134.
- BOULAIN (J.) - 1961 - Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. C.R. Acad. Sci., t. 253, pp. 2568-2570.
- BOULAIN (J.) - 1961 - Facteurs de formation des sols méditerranéens. Sols afr., vol. VI, n° 2 et 3, pp. 249-272.
- BOULAIN (J.) - 1966 - Sur les relations entre les carapaces calcaires et les sols isohumiques de climat xérotérique. Science du Sol, n° 1, pp. 3-14.
- BOULAIN (J.), L'HERMITTE (J.P.) - 1963 - Sur les sols noirs à carapaces calcaires formés sous climat xérotérique. Ann. Centre Rech. Exp. forest. Alger, n° 2, pp. 5-8.
- BRICHETEAU (J.) - 1951 - Note sur la présence d'un horizon calcaire encroûtant dans certains types de sols de la région de Tlemcen. Ec. nat. Agric. Alger, 3 p. multigr.
- DALLONI (M.) - 1951 - Sur la genèse et l'âge des terrains à croûte nord-africains. In : Actions éoliennes, phénomènes d'évaporation et d'hydrologie superficielle dans les régions arides. Alger 27 mars - 31 mars 1951. Coll. int. CNRS, XXXV. Paris, pp. 237-260.
- DELIBRIAS (G.), DUTIL (P.) - 1966 - Formations calcaires lacustres du Quaternaire supérieur dans le massif central saharien (Hoggar) et datations absolues. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 262, pp. 255-258.
- DRANITZINE - 1913 - Cité par AGAFONOFF V. (1935-1936).
- DURAND (J.H.) - 1953 - Etude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. Serv. Et. sci. Pédologie, n° 1. Alger, 209 p.

- DURAND (J.H.) - 1956 - Les croûtes calcaires s.l. d'Afrique du Nord étudiées à la lumière de la biorhexistase. Trav. Sect. Pédol. Agrol., Bull. n° 2. Serv. Et. sci. Et. gén., n° 4, Alger, 19 p.
- DURAND (J.H.) - 1958 - Du nouveau au sujet de la formation des croûtes calcaires s.l. Bull. Soc. Hist. nat. Afr. Nord, t. 49, pp. 196-203.
- DURAND (J.H.) - 1959 - Les sols rouges et les croûtes en Algérie. Serv. Et. sci. Et. gén. n° 7, Alger, 188 p.
- DURAND (J.H.) - 1963 - Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. Bull. Soc. géol. Fr. (7), V, pp. 959-968.
- ERHART (H.) - 1956 - La gènesè des sols en tant que phénomène géologique. Masson & Cie, Paris, 90 p.
- FEDOROFF (N.) - 1961 - Les croûtes et les encroûtements calcaires dans le midi méditerranéen français. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn. (2), vol. IV, fasc. 1, pp. 43-49.
- FLANDRIN (J.), GAUTHIER (M.), LAFFITTE (R.) - 1948 - Sur la formation de la croûte calcaire en Algérie. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 226, pp. 416-418.
- FRAAS (1865) - Cité par AGAFONOFF V. (1935-1936).
- GAUCHER (G.) - 1947 - Les sols à croûte calcaire (Intervention). Conf. Pédol. Méditer. 1947. Alger-Montpellier, pp. 333-336.
- GAUCHER (G.) - 1947 - Les sols rubéfiés et les sols à croûtes du Bas Chélif et des basses plaines oranaises (régions d'Inkermann, de Relizane, de Perregaux et de St Denis du Sig). C.R. Acad. Sci., Paris, t. 225, pp. 133-135.
- GAUCHER (G.) - 1948 - Sur certains caractères des croûtes calcaires en rapport avec leur origine. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 227, pp. 154-156.
- GAUCHER (G.) - 1948 - Sur quelques conditions de formations des croûtes calcaires. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 227, pp. 215-217.
- GAUCHER (G.) - 1959-1960 - Les conditions géologiques de la pédogènesè nord-africaine. Bull. Ass. fr. Et. Sol, 1959, n° 12, pp. 564-576 ; 1960, n° 2, pp. 48-66.
- GIGOUT (M.) - 1958 - Sur le mode de formation des limons et croûtes calcaires du Maroc. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 247, pp. 97-100.
- GIGOUT (M.) - 1960 - Sur la gènesè des croûtes calcaires pleistocènes en Afrique du Nord. C.R. somm. Soc. géol. Fr., fasc. 1, pp. 8-10.
- GILE (L.H.), PETERSON (F.F.), GROSSMAN (R.B.) - 1965 - The K horizon : a master soil horizon of carbonate accumulation. Soil Sci., vol. 99, n° 2, pp. 74-82.
- GILE (L.H.), PETERSON (F.F.), GROSSMAN (R.B.) - 1966 - Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. Soil Sci., vol. 101, n° 5, pp. 347-360.
- GUERASSIMOV (I.P.) - 1954 - Les sols marrons des régions méditerranéennes. Congr. Inter. Sci. Sol. 5. 1954. Léopoldville, Ed. Acad. Sci. U.R.S.S., 40 p.
- HUVELIN (P.) - 1965 - Sols rubéfiés et croûtes calcaires du piedmont septentrional du Haut Atlas de Demate. Notes Serv. géol. Maroc, t. 25 Notes et mémoires, n 185, pp. 95-97
- JARANOFF (D.) - 1936 - L'évolution morphologique du Maroc atlantique pendant le pliocène et le Quaternaire. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., vol. IX, pp. 301-330.
- JARANOFF (D.) - 1937 - Etudes de géologie dynamique au Maroc dans les confins algéro-marocains et en Afrique Occidentale Française. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., vol. X, pp. 135-136.
- MARGAT (J.), RAYNAL (R.), TALTASSE (P.) - 1954 - Deux séries d'observations nouvelles sur les croûtes au Maroc (couloir sud-rifain et Maroc Oriental). Notes Serv. géol. Maroc, t. 10. Notes et Mémoires n° 122, pp. 26-38.
- PERVINQUIERES (L.) - 1903 - Etude géologique de la Tunisie Centrale. Paris, Rudeval.
- POMEL (A.) - 1889 - Description stratigraphique générale de l'Algérie pour servir à l'explication de la 2e éd. de la carte géologique provisoire. Bull. Cart. Géol. Algérie, pp. 188-190.

- RAYNAL (R.) - 1961 - Plaines et piedmonts du Bassin de la Moulouya (Maroc Oriental). Etude géomorphologique. Faculté des lettres, Rabat, 619 p.
- ROSEAU (H.) - 1947 - Les sols à croûte calcaire. (Intervention). Conf. Pédol. Méditer. 1947 Alger-Montpellier, pp. 332-333.
- RUELLAN (A.) - 1962 - Utilisation de la géomorphologie pour l'étude pédologique au 1/20.000 de la plaine du Zebra (Basse Moulouya). Rev. Géogr. Maroc, n° 1 et 2, pp. 23-30.
- RUELLAN (A.) - 1963 - Etude pédologique de la plaine du Zebra. O.N.I., Rabat, 358 p. multigr.
- RUELLAN (A.) - 1965 - Le rôle des climats et des roches sur la répartition des sols dans la Basse Moulouya. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 261, pp. 2379-2382.
- RUELLAN (A.) - 1966 - Les sols isohumiques subtropicaux au Maroc. Conf. Pédol. Méditer. 1966, Madrid, 17 p. multigr.
- STUART (D.M.) - FOSBERG (M.A.), LEWIS (G.C.) - 1961 - Caliche in Southwestern Idaho. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 25, n° 2, pp. 132-135.
- WILBERT (J.) - 1962 - Croûtes et encroûtements calcaires au Maroc. Al Awamia, n° 3, pp. 175-192.
- YANKOVITCH (L.) - 1935-1936 - Etude pédo-agrologique de la Tunisie. Ann. Serv. bot. agron. Tunisie, t. XII-XIII, pp. 417-559.
- YANKOVITCH - 1947 - Les sols à croûtes calcaires. (Intervention). Conf. Pédol. Méditer. 1947. Alger-Montpellier, pp. 336-337.

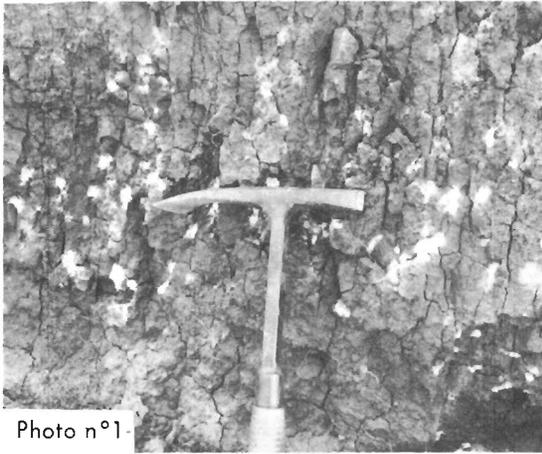
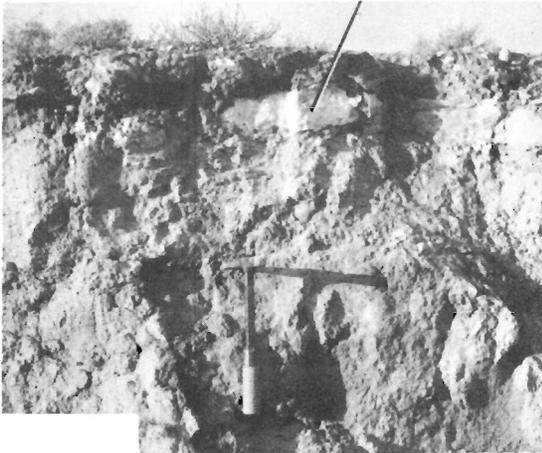


Photo n°1-

Horizon d'accumulation du calcaire sous la forme de gros amas.

Croûte mal développée



Passage progressif entre l'encroûtement tuffeux et un horizon à amas friable

Photo n°2

Horizon d'accumulation du calcaire sous la forme d'un encroûtement tuffeux.

Encroûtement tuffeux et nodulaire; au sommet de cet encroûtement, ébauche d'une croûte: durcissement et léger feuilletage.

Encroûtement nodulaire
Croûte

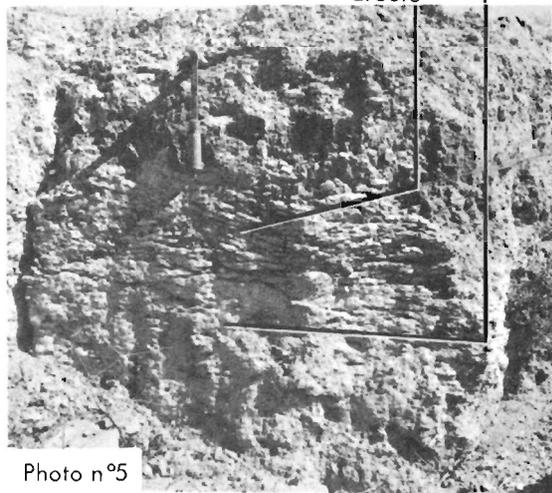


Photo n°5

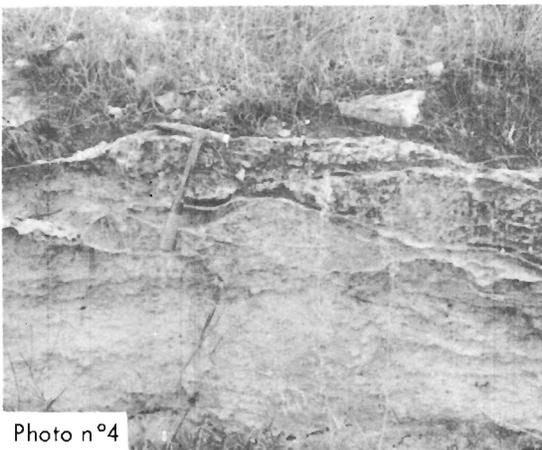


Photo n°4

Croûte

Encroûtement

Dalle compacte disloquée

Croûte

Encroûtement nodulaire

Horizon à amas, granules et nodules

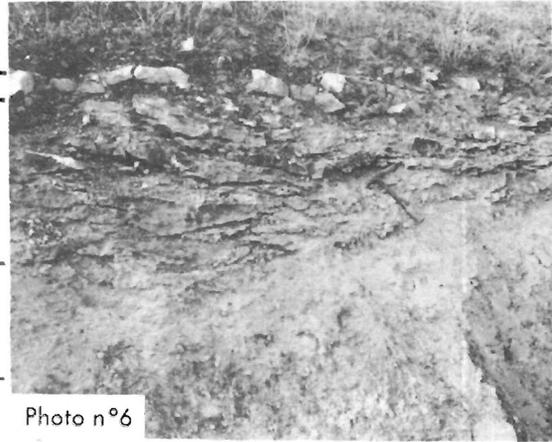


Photo n°6

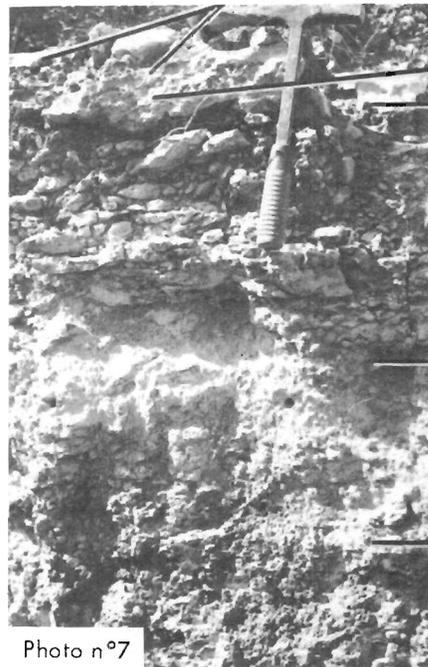


Photo n°8

Pellicule rubanée

Gros feuillet de croûte très durci : tendance à devenir une dalle compacte

Pellicule rubanée



Ebauche d'une dalle compacte

Croûte plus ou moins disloquée

Encroûtement tuffeux à tendance nodulaire

Horizon à amas, granules et nodules

Photo n°7



Photo n°9

Epais feuillets de dalle compacte situés au sommet d'une puissante carapace calcaire du Villafranchien.