

LA GENESE DES ACCUMULATIONS CALCAIRES VUE SOUS L'ANGLE DE L'APPROCHE GEO- MORPHO-PEDOLOGIQUE

par L. BOCK (*) et L. MATHIEU (**)

RESUME. - Sur la base de l'expérience qu'ils ont acquise en Afrique du Nord, les auteurs insistent sur la nécessité de prendre en compte le facteur temps dans l'étude des formations géopédologiques et analysent successivement les différents facteurs de la pédogenèse en prenant l'exemple des accumulations calcaires pour aboutir :

- au rejet de l'horizon Bca du type croûte calcaire développé suivant les schémas classiques du lessivage dans un sol évolué en équilibre avec les conditions climatiques actuelles de l'aride et du semi-aride méditerranéen;
- au rejet d'une interprétation monogénétique due à une approche unique;
- à l'adoption de l'approche morpho-pédologique sur le terrain.
- à la nécessité des analyses pétrographiques et minéralogiques à un niveau élevé d'investigation de laboratoire;
- à la nécessité de ne pas subordonner abusivement l'outil agricole à la recherche de l'objet scientifique.

SAMENVATTING. - Ten gevolge van hun ervaringen in Noord-Afrika dringen de schrijvers er op aan dat men met de factor tijd rekening houdt bij de studie van de geopedologische formaties en ontleden achtereenvolgens de verschillende factoren van de bodemgenese waarbij zij als voorbeeld de kalkopeenhoppingen nemen om te komen :

- ten eerste tot de verwerping van de Bca horizon, van het kalkkorst type, zoals deze ontwikkeld werd volgens het klassieke schema van de uitspoeling van een ontwikkelde bodem in evenwicht met de tegenwoordige klimatologische toestand in het droge en het halfdroge Middellandse Zee gebied;
- ten tweede, het verwerpen van een monogenetische verklaring die voortkomt uit een eenzijdige benadering;
- ten derde, voor een aanvaarding van de morpho-pedologische beschouwingwijze bij terreinwerk;
- ten vierde, tot de noodzaak van petrographische en mineralogische analyses door laboratorium onderzoek op hoog niveau;
- ten vijfde, tot de noodzakelijkheid niet verkeerdelijk het landbouwwerktuig ondergeschikt te maken aan het wetenschappelijk doel.

SUMMARY. - As a result of their experiences in Northern Africa, the authors underline the importance attached to the time factor while studying geopedological formations and analyse successively the different factors of podogenesis using as an example calcareous accumulations, and arrive at the following :

- the rejection of the Bca horizon of the calcareous crust type developed along the traditional diagram of leaching in a mature soil in equilibrium with present day climatic conditions of arid and semid-arid mediterranean regions;
- the rejection of a monogenetical interpretation due to a onesided approach;
- the adoption of the morphopedological approach to the land;
- the necessity of petrographical and mineralogical analyses at a high level of laboratory work;
- the importance of not excessively subordinating the agricultural objective to pedogenetical research.

(*) BOCK, L. : Assistant.

(**) MATHIEU, L. : Chef de Travaux - Service de la Science du Sol (Directeur G. HANOTIAUX),
Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux (Belgique).

1. INTRODUCTION.

Cette note est le fruit d'expériences vécues tant sur le terrain qu'au laboratoire par deux agronomes qui souhaitent, tout à la fois, mieux prendre en compte l'influence du facteur temps en intégrant les études pédogénétiques dans le cadre interdisciplinaire de la géologie du Quaternaire et adopter une méthodologie qui permette d'appliquer logiquement les acquis fondamentaux aux soucis pratiques d'une pédologie agricole.

L. MATHIEU, ancien forestier de l'Administration au Maroc chargé de gestion de forêts, de steppes alfatières, de lutte anti-érosive et de reboisement dans le Moyen-Atlas, le Rif, les plaines arides de la Moulouya et de la province de Taza, s'est montré très tôt partisan de l'approche intégrée en recourant à la géomorphologie et à la géologie du Quaternaire pour définir et cartographier rapidement les milieux et les sols à l'échelle régionale.

L. BOCK a eu l'occasion, dans le cadre de l'enseignement et de la recherche agronomique en Algérie, de pouvoir analyser les cartes morphopédologiques au 1/50.000 (RAUNET, M., pédologue IRAT-SODETEG, 1974) de la dépression subhumide à semi-aride des Beni Slimane et d'y entreprendre une étude pédogénétique fondamentale à l'échelle du terroir pour reconstituer, par focalisations successives, l'évolution des sols dans leur cadre temporo-spatial (quadridimensionnel).

Ainsi, tous deux ont étudié des séquences de versant-glacis-terrasses sous-tendues par des accumulations calcaires et recouvertes par des formations meubles colorées (MATHIEU, L., 1977 a) de terres rouges, noires, grises (STACE H.C.T., 1956 - PUJOS, A., 1957) et de ce fait, leurs références et exemples concernent ce vaste sujet emprunté au milieu méditerranéen où paradoxalement, l'absence de calcaire dans certaines terres rouges a le plus animé la question du calcaire dans les sols.

2. PRESENTATION DU THEME.

A l'occasion du Congrès de Pédologie de Montpellier-Alger de 1947; G. AUBERT est le premier, semble-t-il, qui résuma la question en donnant une définition :

"Les croûtes calcaires sont des bancs peu épais qui affleurent à la surface du sol ou à faible profondeur et qui présentent, en surface, une zone litée très dure, puis une masse dure, souvent noduleuse sur un niveau tendre granuleux; la plus grande partie de ces formations serait fossile et daterait du Quaternaire ancien, même s'il s'en forme encore actuellement".

et en suscitant la discussion autour des différentes conceptions :

- la conception hydrogéologique défendue par G. GAUCHER (in AUBERT, G., 1947, 1948 a, b, c) qui déjà à l'époque insiste sur le caractère fondamental de l'examen pétrographique par lequel il distingue une croûte zonale indépendante de l'encroûtement sous-jacent;
- la conception pédologique per descensum (YANKOVITICH, L. in AUBERT, G., 1947) et per ascensum (FLANDRIN, J. et al., 1948);
- la conception mixte (ROSEAU, H. in AUBERT, G., 1947) ou multiple (CHOUBERT, G., 1948).

Par après, certaines approches ont été pratiquement abandonnées, d'autres affinées et d'autres encore sont apparues :

- l'approche géomorphologique (MARGAT, J. et

al., 1954 - LATTMAN, L.H., 1973, PIAS, J., 1974 - CAPOLINI, J. et al., 1975);

- l'approche globale (DURAND, J. H., 1959 - WILBERT, J., 1962 - DELIBRIAS et al., 1966) et ses variantes morpho-pédologique (RAUNET M., 1974 - THIBOUT, F., 1974) ou édaphique (MATHIEU, L. et al., 1975, 1976 - MATHIEU, L., 1977 a, b, 1979);
- l'approche pédologique (BOULAIN, J., 1957, 1961 - GIGOUT, M., 1958, 1960 - GILE, L. H. 1961, GILE, L. H. et al., 1965, 1966 - RUELLAN, A., 1968, 1971 a, FOURNET, A. 1969 - RUELLAN, A. et al., 1979);
- l'approche géochimique (MILLOT, G. et al., 1969, PAQUET, H. et al., 1969, CONRAD, G., 1969, BOCQUIER, G. et al., 1970 - DUTIL, P. 1971 - NAHON, D. et al., 1975 a - NAHON, D. et al., 1975 b - MILLOT, G. et al., 1976 - MILLOT, G. et al., 1977 - BIGHAM, J. M. et al., 1980);
- l'approche sédimentologique (VOGT, Th. et al., 1973 - MERCIER, J. L. et al., 1974 - VOGT, Th., 1974, 1975, 1977 - FREYTET, P., 1975 - FREYTET, P. et al., 1978 - LACROIX, D. et al., 1981).
- l'approche microbiologique (LUCAS, G. et al., 1967 - BODERGAT, A. M., 1974, MENILLET, F., 1974 - ADOLPHE, J. P. et al., 1974 - ADOLPHE, J. P., 1975 - ADOLPHE, J. P. et al., 1977 - MONTENAT, C. et al., 1977 - KLAPPA, C. F., 1979).
- l'approche expérimentale et technique spécialisée (EK, C. et al., 1965 - PLET LAJOUX, Ch., 1971 - ADOLPHE, J. P. 1972 - SABOURAUD, C. et al., 1978, QUINIF, Y., 1978, LEFEVRE, R. et al., 1979).

Toutes ces disciplines ont permis d'attirer l'attention sur l'un ou l'autre aspect mais sont encore loin de faire l'unanimité sur tous les points comme l'a fait ressortir le colloque de Strasbourg de 1975 intitulé : "Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale", et le séminaire de pédologie d'Alger 1975 intitulé : "Sols calcaires d'Algérie" (BOCK, L., 1975).

3. ANALYSE DES FACTEURS PEDOGENETIQUES EN RELATION AVEC LE THEME.

La façon la plus simple d'analyser les principaux objets de la controverse est sans nul doute d'analyser les différents facteurs de la formule de H. JENNY (1941) :

$$\text{Sol} = f(\text{cl}, \text{r}, \text{p}, \text{o}, \text{t})$$

dans laquelle :

cl = climat, r = roche-mère, p = topographie, o = organismes vivants et t = temps,

tout en commençant par le temps pour lui donner une interprétation plus dynamique, car la faiblesse de cette équation et des classifications pédologiques au niveau supérieur est de ne pas suffisamment tenir compte de ce facteur qu'elles tiennent pour continu; point sur lequel G. MANIL (1950, 1955, 1956) et B. GEZE (1947, 1959) attireraient déjà l'attention et sur lequel G. GAUCHER (1974) et J. TRICART (1974) ont insisté plus récemment.

3.1. LE TEMPS.

Les travaux des géologues et géomorphologues mirent très tôt en évidence qu'il y avait plusieurs générations d'accumulations calcaires et que, la plus puissante étant aussi la plus ancienne, leur épaisseur

diminuait avec l'âge pour être finalement relayée par les formations meubles colorées du Quaternaire récent. En conséquence, une échelle de chronostratigraphie continentale basée sur les cycles climatiques pluviaux-interpluviaux fut proposée (CHOUBERT, G. et al., 1956) et bien que contestée dans ses hypothèses morphogénétiques (BEAUDET, G. et al., 1967) n'en demeure pas moins acceptable (BEAUDET, G., 1969 - MATHIEU, L. 1977a) et de plus en plus appliquée au Maghreb (GUIRAUD, R., 1968). Dans ce contexte :

- B. GEZE (1959) propose une classification des sols en fonction de leur âge (sols actuels non évolués ou évolués, sols hérités monophasés ou polyphasés, sols fossiles enterrés, exhumés ou momifiés);
- A. RUELLAN (1971b) analyse quelques problèmes de définition et d'interprétation liés à l'histoire des sols (sols en équilibre, sols à caractères reliques, sols enterrés) pour faire remarquer que certains pédologues multiplient les caractères reliques alors que d'autres, parmi lesquels il se compte, défendent une longue évolution pédologique par des processus lents et/ou rapides (RUELLAN, A., 1967) dans des formations autochtones tout au plus remaniées.

Ainsi naît la controverse entre les tenants des paléosols et les tenants des sols vieux.

3.2. LE CLIMAT.

D'un côté, R. RAYNAL (1955, 1956, 1961, 1965) montre que :

- les phénomènes périglaciaires sont loin d'avoir été négligeables en Afrique du Nord et qu'ils se sont répartis suivant les lois non seulement de la zonalité latitudinale mais aussi altitudinale;
- l'évolution climatique doit être définie comme un mouvement pendulaire dont les oscillations s'amortissent progressivement comme l'ont confirmé les analyses palynologiques (PONS et al., 1956 - BEUCHER, F., 1963);
- les cycles climatiques comportent quatre phases : paroxysmale, décroissante, interpluviale et ascendante;
- chaque cycle n'a pas été l'exact recommencement du précédent et qu'il existe des variantes spatiales vers l'aride ou le subhumide.

D'un autre côté, A. RUELLAN (in BEAUDET, G. et al., 1967) estime que les climats quaternaires du Maroc ont toujours été méditerranéens et répartis de façon semblable à celle des climats actuels, bien qu'il admette que la pédogenèse actuelle est très ralentie dans les plaines et qu'il faut attribuer la plupart des sols à des paléoclimats plus humides.

Ainsi naît la controverse entre les tenants de la discontinuité climatique de cycles et/ou de phases et les tenants d'une plus ou moins nette continuité.

3.3. LA ROCHE-MERE.

- Selon A. RUELLAN (1968), la plus grande partie des horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire sont le résultat d'une même famille de processus pédologiques et constituent le Bca de sols à profil calcaire différencié.
- Tandis que selon L. MATHIEU (1977, 1979) l'étude de la genèse des accumulations calcaires

relève du domaine de la paléopédologie et la croûte calcaire servirait actuellement de substrat à des dépôts d'apports latéraux postérieurs ou de roche-mère Cca subissant la dissolution.

Ainsi naît la controverse entre les tenants d'une liaison génétique étroite et les tenants de la superposition ou de l'altération des dépôts.

3.4. LA TOPOGRAPHIE.

- Alors que J. H. DURAND (1959), dans son application de la théorie bio-rhexistasi-que de ERHART (1956), considère que les limons rouges et les sols rubéfiés sont le résultat de dépôts de produits d'érosion;
- A. RUELLAN (1971 a) estime que le fait de retrouver des débris d'accumulations calcaires dans l'horizon A n'est pas une preuve d'allochtonie mais de remaniement presque sur place créant de fausses discontinuités lithologiques et que la teneur en calcaire d'un horizon superficiel et son épaisseur ne sont pas à corréler avec la puissance (épaisseur et richesse en calcaire) de l'accumulation, car il suffit d'admettre le lessivage oblique.

Ainsi naît la controverse entre les tenants de l'allochtonie et les tenants de l'autochtonie.

3.5. LES ORGANISMES VIVANTS.

- J. BOULAIN (1961) et A. RUELLAN (1971a) décrivent les accumulations calcaires comme des horizons de sols évolués de glaciaire;
- L. MATHIEU (1977) les définit comme des paléosols de types azonaux ou tout au plus intrazonaux, à hydromorphie généralisée ou simplement profonde mais certainement pas comme des sols évolués;
- C.F. KLAPPA (1979) rapporte que le résultat de la désintégration biophysique, de la décomposition biochimique et de la biosynthèse des composants minéraux engendrent la formation de protosols pelliculaires dont l'induration et la colonisation par des lichens saxicoles conduit à des constructions stromatolithiques qui marquent de ce fait les surfaces de discontinuités subaériennes du passage vers des conditions terrestres.
- P. FREYTET (1975 et al., 1978) distingue les accumulations calcaires de glaciaire et de milieu fluviatile, palustre et supramarin.

Ainsi naît la controverse entre les tenants d'une pédologie évoluée dans un milieu aérien marqué par une végétation supérieure et les tenants d'une pédologie naissante sous une activité organique diversifiée en milieu supra-aquatique.

4. RECHERCHE D'UNE METHODOLOGIE DE TERRAIN.

A la suite du colloque de Strasbourg, plusieurs auteurs ont publié des articles de synthèse particulièrement virulents à l'égard de la pédologie :

- Th. VOGT (n. daté) condamne les pédologues pédologistes;
- J. VAUDOUR (et al., 1976) incrimine la prépondérance coercitive de l'interprétation pédologique qui en arrive à priver d'expression certaines conceptions contradictoires.

Force est de constater que la pédologie classique propose une version verticaliste et statique des faits même si certains raisonnements théoriques ou observations sont à retenir. Cette tendance excessive à la reconstitution génétique a d'ailleurs déçu nombre de praticiens de l'agriculture et incité G. GAUCHER (1968-1974) à rédiger plusieurs plaidoyers pour une pédologie agricole !

C'est pourquoi, les auteurs ont mené leurs travaux en partant non pas du sol, c'est-à-dire du profil subdivisé en horizons du haut vers le bas ou de la séquence explorée après coup de l'aval vers l'amont mais bien en considérant l'ensemble du paysage, c'est-à-dire les formations géopédologiques (dépôt et sol) subdivisées en couches ou horizons à partir de considérations tant sédimentologiques que pédologiques. Pour ce faire et après avoir personnellement défendu l'utilisation de la géomorphologie en pédologie (MATHIEU, L., 1962, 1971, 1977) et la caractérisation litho-pédologique (BOCK, L., 1972), ils se sont ralliés à l'approche morpho-pédologique définie suivant le concept d'écographie intégrée de J. TRICART (1974) qui estime que la morphodynamique est le véritable intégrateur du sol dans le paysage. Ainsi, par le bilan des actions régressives ou progressives, c'est-à-dire des interactions morphogénèse-pédogénèse, il est possible de cerner les propriétés et la dynamique récente du solum biodynamique qui seules, en définitive, intéressent le pédologue agricole dans sa recherche des facteurs limitants, des contraintes, des classements de terres et de la mise en valeur dans le cadre d'un aménagement bien compris (BOCK, L. et al., 1981).

L'exemple proposé en diapositives au cours de la journée "Pédologie" du mercredi 10 mars 1982 est emprunté à la thèse de L. BOCK (à paraître); il concerne un glacis de versant situé à 60 km au sud d'Alger à vol d'oiseau et façonné dans des dépôts continentaux du Mio-Pliocène qui comblent un anticlinal évidé dans le Crétacé formant un sillon intratellien. Ce glacis marqué par l'endoréisme (cuvette) montre bien que les accumulations calcaires continues sont en voie d'altération et que les diverses formations meubles colorées s'y superposent ou s'y développent en fonction de positions géomorphologiques bien précises; formations meubles qui dans le cas des terres rouges sont également recouvertes par un manteau colluvial riches en éléments grossiers.

5. RECHERCHE D'UNE METHODOLOGIE DE LABORATOIRE.

Au laboratoire, les auteurs sont d'avis qu'après une sélection des échantillons par les analyses pédochimiques de base (pH, calcaire total, granulométrie, carbone total et capacité d'échange cationique), certaines techniques de la pétrographie et de la minéralogie doivent intervenir à un niveau élevé d'investigation, sans devenir une fin en soi, pour permettre de préciser l'ambiance géochimique. C'est ainsi que, dans le cas précis de cette étude, le faisceau suivant de présumption a été constitué et interprété avant tout autre résultat d'analyse dans la logique d'une progression sélective de cause à effet d'après le schéma d'une fine chromatographie:

5.1. LE DEPISTAGE DE L'ATTAPULGITE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION AVEC LA COLLABORATION DE A. RASSEL (*).

Le cas de l'attapulgitite est intéressant, car il illustre le bien fondé des critiques émises à l'égard d'une certaine pédologie. En effet, G. MILLOT (1969), après avoir considéré que ce silicate aluminomagnésien de la surface de l'écorce terrestre ne prenait pas naissance au cours de la pédogénèse mais seulement dans la sédimentation chimique basique lacustre (MILLOT, G. et al., 1957) et marine (MILLOT, G., 1964), interprète l'attapulgitite comme un minéral de néoformation pédologique dans les sols à caparace calcaire sur base des données de A. RUELLAN (1971 a) et crée le précédent de ce critère de reconnaissance alors que, comme le fait pertinemment remarquer Th. VOGT (n. daté), l'unanimité n'est pas faite sur l'origine même de ces formations. Ce que J. M. BIGHAM et al. (1980) n'ont pas manqué d'exprimer en reconnaissant plutôt une origine authigène à ce minéral; tendance qui est partagée ici puisqu'on ne retrouve l'attapulgitite, ni dans le Crétacé, ni dans les formations meubles colorées de surface, ni dans les croûtes zonaires mais bien dans des milieux micro et macro confinés.

5.2. L'ETUDE DES LAMES MINCES AU MICROSCOPE.

Modestement dans le sillage de Th. VOGT (1974, 1975) et D. LACROIX et al. (1981), la reconnaissance de structures stromatologiques dans les croûtes zonaires, d'accumulation calcaires à faciès perlitiques et/ou présentant des peloids incitent à opter pour l'interprétation de C. F. KLAPPA et les nuances de P. FREYTET (Cf. 3.5.).

5.3. L'ETUDE DES MINERAUX DENSES TRANSPARENTS REALISEE PAR D. LACROIX (**).

Bien que ces minéraux soient en faible quantité, cette reconnaissance basée sur les proportions relatives de zircon, de tourmaline et d'épidote a permis de distinguer par analogie les matériaux sous-jacents des accumulations calcaires continues de ceux sus-jacents.

5.4. LES MINERAUX ARGILEUX PAR DIFFRACTOMETRIE RX AVEC LA COLLABORATION DE J. M. MARCOEN (**).

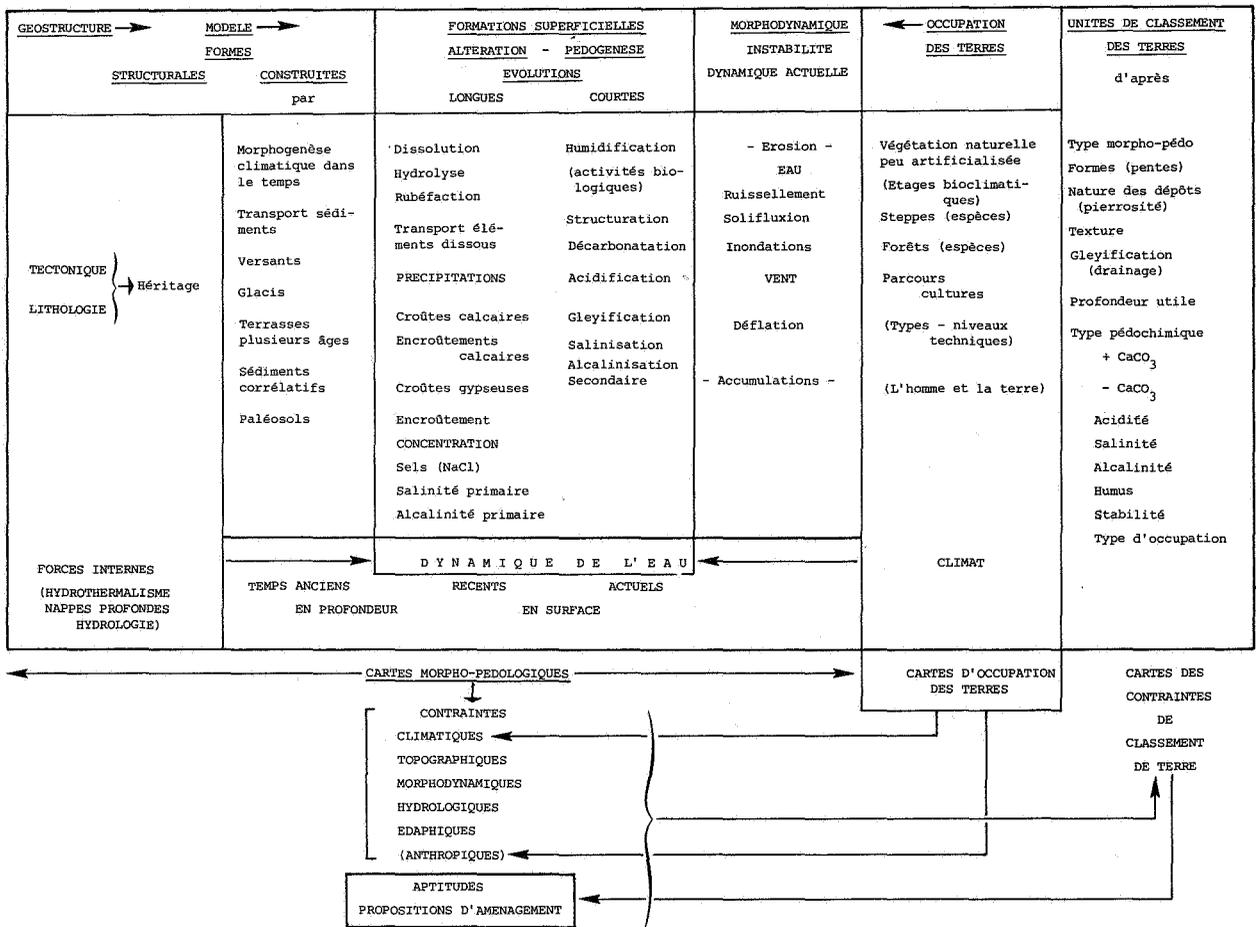
Nombreux sont les auteurs qui ont insisté sur l'importance de cette détermination en pédologie (SCHOEN, V., 1969 - MILLOT, G. et al., 1969 - LAMOUREUX, M. et al., 1973 - MATHIEU, L. et al., 1975 - MARCOEN, J. M., 1977) non seulement pour la caractérisation des ambiances géochimiques et de leurs tendances évolutives mais aussi pour l'appréhension du complexe absorbant avec ses conséquences physiques et chimiques dans les sols. Tendances qui dans l'exemple sont caractérisées par un double héritage d'amont et d'aval agrémente sans doute de quelques transformations :

- à partir de l'amphithéâtre du Crétacé avec les kandites en teneur faible mais généralisée, le mélange d'illites et de gonflants dans les chenaux ou sur les glacis de pente et l'illites dominantes sur les glacis de plateau;

(*) A. RASSEL : Chef de travaux à la Station de Chimie et de Physique Agricoles à Gembloux.

(**) D. LACROIX et J. M. MARCOEN : Chefs de travaux à la Chaire de la Science de la Terre.

Les facteurs principaux pris en compte par l'analyse intégrée en milieu méditerranéen.



- à partir du milieu d'accueil continental qui entretient le confinement de formations lithomorphes.

Ainsi, la réalisation d'analyses pétrographiques et minéralogiques venant à la suite normale du terrain permet de confirmer les discontinuités de profil et de préciser les milieux d'accueil de la pédogenèse actuelle pour laquelle on peut envisager maintenant l'étude de la matière organique et de la dynamique des éléments de même que certaines caractérisations physiques.

6. CONCLUSIONS.

Les auteurs n'ont pas eu la prétention, en quelques pages, de présenter une réelle démonstration avec preuves à l'appui mais bien d'attirer l'attention sur l'importance du facteur temps et du bilan morpho-pédologique dans l'étude des formations meubles superficielles qui ont été trop souvent interprétées sous l'angle d'une approche unique; bilan qui appelle vérification en recourant aux analyses pétrographiques et minéralogiques avant celles de la pédologie, car c'est seulement de cette façon que les milieux d'accueil et la mise en place des matériaux peuvent être bien compris. La pédologie peut alors prendre le relais, soit comme objet sous son angle génétique en cherchant à définir la part du biologique pour chaque couche décrite, soit comme outil sous son angle agricole en considérant globalement le

profil avec ses facteurs chimiques et physiques limitants sans chercher abusivement à le classer comme type homogène. C'est pourquoi par l'exemple choisi, il est fait très nettement opposition au concept monogénétique du profil calcaire différencié avec son horizon Bca à croûte suivant le schéma classique du lessivage dans un sol évolué en équilibre avec les conditions climatiques actuelles de l'aride et du semi-aride méditerranéens.

En conclusion, tout en considérant que la plupart des controverses au sujet des formations corrélatives trouvent leur origine dans les différences de conception "a priori" au niveau des définitions de base et dans les nomenclatures interprétatives, L. MATHIEU et L. BOCK résumant leurs réflexions par un tableau en estimant qu'il faut davantage tenir compte selon l'expression de J. TRICART, de la logique interne des phénomènes qui existent dans la nature et qui imposent une adaptation des méthodes d'approche ainsi qu'une hiérarchie taxonomique des sciences (et des techniques) pour mettre en évidence les interférences entre phénomènes.

BIBLIOGRAPHIE.

ADOLPHE, J. P. (1972) - "Obtention d'encroûtements carbonatés par gel expérimental". C. R. Ac. Sc., Paris, t. 274, D., 1139-1142.

- ADOLPHE, J. P. & BILLY, C. (1974) - Biosynthèse de calcite par une association bactérienne aérobie. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 278, D. 2873-2875.*
- ADOLPHE, J. P. (1975) - Rôle des microorganismes dans les concrétionnements calcaires continentaux. *Col. Strasbourg, 71 - 75 cf. Vogt, Th.*
- ADOLPHE, J. P. & MARECHAL, C. (1977) - Minéralisation des dépôts carbonatés expérimentaux d'origine microbienne. Comparaison des roches calcaires obtenues par biogénèse à celles actuelles et fossiles observées dans la nature. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 284, D., 1381-1384.*
- AUBERT, G. (1947) - Les sols à croûte calcaire. *C.R. Conf. Pédol. médit., Montpellier - Alger, publ. A.F.E.S., Fr. 330-337.*
- BEAUDET, G. - MAURER, G. & RUELLAN, A. (1967) - Le Quaternaire marocain, observations et hypothèses nouvelles. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., (2), v. IX, f. 4, 289-310.*
- BEAUDET, G. (1969) - Le Plateau Central Marocain et ses bordures. Etude géomorphologique. *Th. publ. avec l'aide Min. Enseign. Sup. Mar. et Min. Ed. Nat. Fr. Aff. Etr. Rabat, 478 p.*
- BEUCHER, F. (1963) - Flores quaternaires au Sahara nord-occidental, d'après l'analyse pollinique de sédiments prélevés à Hassi-Zguilma (Saoura). *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 256, D. 2205-2208.*
- BIGHAM, J. M., JAYNES, W. F. & ALLEN, B.L. (1980) - Pedogenetic degradation of sepiolite and palygorskite on the Texas High Plains. *S. Sc. Soc. Am., v. 44, n°1, 159-167.*
- BOCK, L. (1972) - Les terrasses de la Semois - Essai d'une caractérisation lithopédologique sur la rive droite, entre Jamoigne et Moyen. *T. F. E., Sc. Sol. Fac. Sc. Agron. Gembloux, Belg., 215 p.*
- BOCK, L. (1975) - Sols calcaires d'Algérie. *Sém. Péd. I.N.A., Alg., Livret-guide de l'excursion, ronéo, 23 p.*
- BOCK, L., CALEMBERT, J. & MATHIEU, L. (1981) - Réflexions sur les aptitudes des terres en milieu méditerranéen. *Pédol., Belg., XXXI, 47-64.*
- BOCQUIER, G., PAQUET, H. & MILLOT, G. (1970) - Un nouveau type d'accumulation oblique dans les paysages géochimiques : l'invasion remontante de la montmorillonite. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 270, D. 460-463.*
- BODERGAT, A. M. (1974) - Les microcodiums - milieu et modes de développement. *Doc. Lab. Géol., Fac. Sc. Lyon, n° 62, 137-235.*
- BOULAIN, J. (1957) - Etudes des sols des plaines du Chéelif. *Ser. Et. Sc. Alg., 582 p.*
- BOULAIN, J. (1961) - Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 253, 2568-2570.*
- CAPOLINI, J. et SARY, M. (1975) - Quelques aspects de la répartition des croûtes et encroûtements calcaires et calco-gypseux du piedmont Sud du Hodna. *Col. Strasbourg, 133-139, cf. Vogt, Th.*
- CHOUBERT, G. (1948) - Au sujet des croûtes calcaires quaternaires. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 226, 1630-1631.*
- CHOUBERT, G., JOLY, F., GIGOUT, M., MARCAIS, J., MARGAT, J. et RAYNAL, R. (1956) - Essai de classification du Quaternaire continental du Maroc. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 243, 504-506.*
- CONRAD, G. (1969) - L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. *C.N.R.S., Paris, Zones arides, s. géol. n°10, 527 p.*
- DELIBRIAS, G. & DUTIL, P. (1966) - Formations calcaires lacustres du Quaternaire supérieur dans le massif central supérieur saharien (Hoggar) et datations absolues. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 262, D. 55-58.*
- DURAND, J. H. (1959) - Les sols rouges et les croûtes en Algérie. *Dir. Hydr. Equip. Rur., Serv. Et. Sc., Alg., 188 p.*
- DUTIL, P. (1971) - Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. *Th., Univ., Strasbourg, C.N.R.S., A. 6. 094, 346 p.*
- EK, C. & PISSART, A. (1965) - Dépôt de carbonate de calcium par congélation et teneur en bicarbonate des eaux résiduelles. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 260, g. 9, 929-932.*
- ERHART, H. (1956) - La genèse des sols en tant que phénomène géologique. *Masson et Cie, Paris, 83 p.*
- FLANDRIN, J., GAUTIER, M. et LAFITTE, R. (1948) - Sur la formation de la croûte calcaire superficielle en Algérie. *C. R. Ac. Sc., Paris, 226, 416-418.*
- FOURNET, A. (1969) - Etude pédologique de la dorsale tunisienne. *Mém., Fac. Sc. Univ. Paris, 116 p. + 57 p.*
- FREYTET, P. (1975) - Concrétions calcaires pédologiques et analogies avec les calcaires "palustres" (bordures de lacs à sédimentation carbonatée); exemples pris dans le Crétacé supérieur et le Tertiaire de France. *Col. Strasbourg, 51-54, cf. Vogt, Th.*
- FREYTET, P. & PLAZIAT, J. C. (1978) - Les redistributions carbonatées pédogénétiques (nodules, croûtes, "calcrettes") : les deux types principaux d'environnements favorables à leur développement. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 286, D. 1775-1778.*
- GAUCHER, G. (1947) - Interventions in G. AUBERT.
- GAUCHER, G. (1948a) - Sur certains caractères des croûtes calcaires en rapport avec leur origine. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 227, 154-156.*
- GAUCHER, G. (1948b) - Sur quelques conditions de formation des croûtes calcaires. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 227, 215-217.*
- GAUCHER, G. (1948c) - Sur la notion d'optimum climatique d'une formation pédologique. *C. R. Ac. Sc., Paris, t. 227, 290-292.*
- GAUCHER, G. (1968) - Traité de pédologie agricole. Le sol et ses caractéristiques agronomiques. *Agron. Nouv., Dunod, Paris, 578 p.*
- GAUCHER, G. (1974) - Plaidoyer pour la pédologie agricole. *Agron. Trop., Paris, s. Agron. gén., n°2-3, 131-140.*
- GEZE, B. (1947) - Paléosols et sols dus à l'évolution actuelle. *C. R. Conf. Pédol. médit. Montpellier. Alger, public. A.F.E.S., Fr. 140-156.*

- GEZE, B. (1959) - La notion d'âge du sol. Son application à quelques exemples régionaux. *An. Agron. Fr.*, n°3, 237-255.
- GIGOUT, M. (1958) - Sur le mode de formation des limons et croûtes calcaires du Maroc. *C. R. Ac. Sc., Paris*, t. 247, 97-100.
- GIGOUT, M. (1960) - Sur la genèse des croûtes calcaires pléistocènes en Afrique du Nord. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 1, 8-10.
- GILE, L. H. (1961) - Soil genesis of Ca horizons in soils of a desert region. Dona Assa Country New Mexico. *S. Sc. Soc. Am.*, 25, 1, 52-61.
- GILE, L. H., PETERSON, F. F. & GROSSMAN, R. B. (1965) The K. Horizon : A master soil horizon of carbonate accumulation. *S. Sc.*, v. 99, n°2, 74-82.
- GILE, L. H., PETERSON, F. F. & GROSSMAN, R. B. (1966) Morphological and genetic Sequences of Carbonate Accumulation in Desert Soils. *S. Sc.*, v. 101, n°5, 347-360.
- GUIRAUD, R. (1968) - Le Plio-Quaternaire du Bassin du Hodna (Algérie du Nord). *C. R. Ac. Sc., Paris*, t. 267, D., 561-564.
- KLAPPA, C. F. (1979) - Lichen Stromatolites : criterion for subaerial exposure and a mechanism for the formation of laminar calcretes (Caliche). *Journ. Sed. Petr.*, v. 49, n°2, 387-400.
- JENNY, H. (1941) - Factors of soil formation. *Mc Graw-Hill, London*.
- LACROIX, D. et MATHIEU, L. (1981) - Etude pétrographique d'un glaciais à croûte calcaire : la Gaada-el-Hamra (Maroc). *Rech. Géogr., Univ. Strasbourg*, n°12, 45-54.
- LAMOUREUX, M., PAQUET, H. & MILLOT, G. (1973) - Evolution des miréaux argileux dans les sols du Liban. *Pédol., Belg.*, XXIII, 1, 53-71.
- LATTMAN, L. H. (1973) - Calcium carbonate accumulation of alluvial forms in Southern Nevada. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 84, 3013-3028.
- LEFEVRE, R., BARBILLAT, J., CUIF, J. P., DHAMELINCOURT, P. et LAUREYNS, J. (1979) - Caractérisation minéralogique directe, par microsonde laser à effet Raman, des alternances calcite aragonite mises en évidence chimiquement par analyse ionique dans une algue Solénopore triasique. *C. Ac. Sc., Paris*, t. 288, D., 19-22.
- LUCAS, G. & MONTENAT, Ch. (1967) - Observations sur les structures internes et le développement des microcodiums. *Bull., Soc. Géol., Fr.*, (7), IX, 909-918.
- MANIL, G. (1950) - Géologie et pédologie. Discussion sur le problème de la roche-mère. *Congr. Nat. Sc.*, IV, 1-4.
- MANIL, G. (1955) - Quelques types spéciaux de paléosols et leur importance géomorphologique. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. LXXVIII, 289-296, 1954-55.
- MANIL, G. (1956) - Aspects dynamiques du profil pédologique. *6e Congrès Int. Sc. Sol, Paris*, V. 72, 439-441.
- MARCOEN, J. M. (1977) - Contribution à l'étude minéralogique de la fraction argileuse des sols à charge organique. *Th., Sc. Terre, Fac. Sc. Agronom., Gembloux, Belg.* 262 p.
- MARGAT, J., RAYNAL, R. et TALTASSE, P. (1954) - Deux séries d'observations nouvelles sur les croûtes au Maroc. *Notes Serv. Géol. Maroc*, t. 10, n°122, 25-35.
- MATHIEU, L. (1962) - Géomorphologie appliquée à la prospection des sols à reboiser dans la plaine de Guercif (Maroc Oriental). *Rev. Géog., Mar.*, Nos 1-2, 49-53.
- MATHIEU, L. (1971) - Utilité et place de la géomorphologie dans les études préalables à la mise en valeur agricole et aux travaux forestiers. *Bull. Rech. Agron., Gembloux, Belg.*, v. extr., 144-154.
- MATHIEU, L., THOREZ, J. & EK, C. (1975) - Contribution à l'étude des encroûtements calcaires dans le cadre de la morphogenèse et de la pédogenèse en climat méditerranéen semi-aride et aride : application à la région de Taza (Maroc). *Col. Strasbourg*, 114-120 cf. VOGT, Th.
- MATHIEU, L., THOREZ, J. & EK, C. (1976) - Place et signification des croûtes et encroûtements calcaires dans les profils de sol et dans les paysages d'Afrique du Nord-Ouest. *An. I.N.A., Alg.*, Vol. VI, n°1, 81-138.
- MATHIEU, L. (1977a) - La géomorphologie et la géologie quaternaire comme bases fondamentales pour une juste définition et une cartographie rapide des sols et des milieux. *Th., Sc. Sol, Fac. Sc. Agron. Gembloux, Belg.*, 3 t., 1017 p.
- MATHIEU, L. (1977b) - Are North African Quaternary Calcrete a horizon of accumulation in a soil or a sediment ? *Com., I.N.Q.U.A., Birmingham, ronéo*, 10 p.
- MATHIEU, L. (1979) La transition du Pléistocène Supérieur à l'Holocène dans la province de Taza (Maroc Oriental). *An., Soc. Géol., Belg.*, t. 101, 131-147.
- MENILLET, F. (1974) - Sur la présence de structure stromatolithique dans les calcaires de Beauce, formations dulcaquicoles du Stampien supérieur à l'Aquitainien dans le bassin de Paris. *C. R. Ac. Sc., Paris*, t. 278, D, 3173-3176.
- MERCIER, J. L. & VOGT, Th. (1974) - Etude d'un encroûtement calcaire des environs de Narbonne : signification génétique et géomorphologique. *Bull. AFEQ*, 2, 73-79.
- MILLOT, G., RADIER, H. & BONIFAS, M. (1957) - La sédimentation argileuse à attapulгите et montmorillonite. *Bull., Soc. Géol., Fr.*, (6), VII, 425-433.
- MILLOT, G. (1964) - Géologie des argiles. *Masson et Cie, Paris*, 499 p.
- MILLOT, G., PAQUET, H. & RUELLAN, A. (1969) - Néof ormation de l'attapulгите dans les sols à carapaces calcaires de la basse Moulouya (Maroc Oriental). *C. R. Ac., Sc., Paris*, t. 268, D, 2771-2774.
- MILLOT, G., BOCQUIER, G. et PAQUET, H. (1976) - Géochimie et paysages tropicaux. *La Recherche*, n°65, 236-244.
- MILLOT, G., NAHON, D., PAQUET, H., RUELLAN, A. & TARDY, Y. (1977) - L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays subaride Antiatlas, Maroc. *Bull., Sc. Géol., Strasbourg*, 30, 3, 129-152.
- MONTENAT, Ch. & ECHALLIER, J. C. (1977) - L'importance des structures organiques du type microcodium dans la constitution des croûtes calcaires pléistocènes. *C.R. Ac., Sc., Paris*, t. 285, D, 3-6.

- NAHON, D., PAQUET, H., RUELLAN, A. & MILLOT, G. (1975a) - Encroûtements calcaires dans les altérations des marnes éocènes de la falaise de Thiès (Sénégal). Organisation morphologique et minéralogique. *Bull. Sc. Géol. Strasbourg*, 28, 1, 29-46;
- NAHON, D. et RUELLAN, A. (1975b) - Les accumulations de calcaire sur les marnes éocènes de la falaise de Thiès (Sénégal); mise en évidence des phénomènes d'épigénie. *Col. Strasbourg*, 7-11, cf. Vogt, Th.
- PAQUET, H., RUELLAN, A., TARDY, Y. & MILLOT, G. (1969) - Géochimie d'un bassin versant au Maroc Oriental. Evolution des argiles dans les sols des montagnes et des plaines de la basse Moulouya. *C.R. Ac., Sc. Paris*, t. 289, D, 1839-1842.
- PIAS, J. (1974) - Genèse des croûtes et encroûtements calcaires en Afghanistan au Quaternaire récent. 10 th. *Int. Congr. S. Sc. Nauca. Publ. House, Moscow*, p2, 394-401.
- PLET-LAJOUX, Ch. (1971) - Recherches expérimentales sur la formation des encroûtements calcaires. *Bull. A.F.E.S., Fr.*, n°5, 7-10.
- PONS, A. et QUEZEL, P. (1956) - Premiers résultats de l'analyse palynologique de quelques paléosols sahariens. *C. R. Ac. Sc., Paris*, t. 243, 1656-1658.
- PUJOS, A. (1957) - Terres rouges, noires et grises. *Soc. Sc. Nat. Phys., Mar., Sect. Pedol.*, t. 12, 69-85.
- QUINIF, Y. (1978) - Les radioéléments naturels dans les dépôts détritiques de grottes. Premiers résultats. 6e Congrès Nat. Spéléologie, Suisse, 6 p.
- RAUNET, M. (1974) - Etude morpho-pédologique dans la région des Beni Slimane (Algérie) - contraintes pour la mise en valeur. *Agron. Trop., Paris, s. Agron. gén.*, n°2-3, 258-299 + 3 cartes.
- RAYNAL, R. (1955) - Oscillations climatiques et évolution du relief au cours du Quaternaire. *Notes Soc. Géogr. Mar.*, n°5, 10-14.
- RAYNAL, R. (1956) - Les phénomènes périglaciaires au Maroc et leur place dans l'évolution morphologique. *Biuletyn Peryglacjalng, com. morphol. périglac.*, n°4, 143-162.
- RAYNAL, R. (1961) - Originalité des phénomènes périglaciaires au Sud de la Méditerranée. *Biuletyn Peryglacjalng*, n°10, 31-33.
- RAYNAL, R. (1965) - Sédimentation et évolution des processus géomorphologiques au cours des pluviaux quaternaires en Afrique du Nord. *Atti, 1er Congr. Int., Studi Nord Afric., Cagliari*, 115-125.
- ROSEAU, H. (1947) - Interventions in G. AUBERT.
- RUELLAN, A. (1967) - Le rôle des sols dans l'interprétation des variations bioclimatiques du Pléistocène Marocain. *VI Congr. Panafric. Préhist. Et. Quatern.*, Dakar, ronéo, 24 p.
- RUELLAN, A. (1968) - Les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols du Maroc. 9ème Congr. Int. Sci. Sol, Adélaïde, IV, 501-510.
- RUELLAN, A. (1971a) - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes. Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la basse Moulouya (Maroc Oriental). *Mém. O.R.S.T.O.M., Paris*, n°54, 302 p.
- RUELLAN, A. (1971b) - The history of soils : some problems of definition and interpretation. *Paleopedology, Int. Soc. S. Sc.*, ed. Dan H. YAALON, 3-13.
- RUELLAN, A., BEAUDET, G., NAHON, D., PAQUET, H., ROGNON, P. & MILLOT, G. (1979) - Rôle des encroûtements calcaires dans le façonnement des glaciers d'ablation des régions arides et semi-arides du Maroc. *C. R. Ac. Sc., Paris*, t. 289, D, 619-622.
- SABOURAUD, C. & HUMBERT, L. (1978) - Endoscopie des cristaux de calcite colmatant le réseau poreux fissural des calcaires et restitution de l'évolution tectonique et diagénétique; étude préliminaire. *C. R. Ac., Sc., Paris*, t. 287, D, 667-670.
- SCHOEN, U. (1969) - Contribution à la connaissance des minéraux argileux dans le sol marocain. *Cah. Rech. Agron., Rabat*, 179 p.
- STACE, H. C. T. (1956) - Chemical characteristics of Terra Rossas and Rendzines of South Australia. *Journ. S. Sc.*, v. 7, n°2, 280-293.
- THIBOUT, F. (1974) - Interactions morphogénèse-pédogénèse. Exemple d'application dans la région de Bechloul (Algérie). *Agron. Tropic., Paris, s. agron. gén.*, n°2-3, 300-311.
- TRICART, J. (1974) - De la géomorphologie à l'étude écographique intégrée. *Agron. Tropic., Paris, s. agron. gén.*, n°2-3 122-132.
- VAUDOUR, J. & CLAUZON, G. (1976) - Les croûtes calcaires ont-elles toutes une origine pédologique ?. *Méditerranée*, n°1, 71-81.
- VOGT, Th. & MAROCKE, R. (1973) - Les encroûtements calcaires de la Hardt (Haute Alsace) : genèse et évolution. *Bull. Sc. Géol.*, 26, 4, 305-314.
- VOGT, Th. (1974) - Etude en lame mince d'un sédiment périglaciaire à encroûtement calcaire. *C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 279, D, 1999-2002.
- VOGT, Th. (1975) - Types de croûtes calcaires en France méditerranéenne d'après étude micrographique. *Col. "Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale". Univ. Strasbourg*, 30-34.
- VOGT, Th. (1977) - Croûtes calcaires quaternaires de période froide en France méditerranéenne. *Z. Géomorph. NF.*, 21, 1, 26-36.
- VOGT, Th. (non daté) - Un siècle de recherches françaises sur les croûtes calcaires : exemples de rapport et de lettres entre théories, disciplines et écoles scientifiques. *Ronéo*, 24 p.
- WILBERT, J. (1962) - Croûtes et encroûtements calcaires au Maroc. *Al Awamia, Rabat*, n°3, 75-192.
- YANKOVITCH, L. (1947) - Interventions in G. AUBERT.

Communication présentée au cours de la
Séance du 10 mars 1982.